



**Universidad**  
Zaragoza



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
**Universidad** Zaragoza

PROYECTO FIN DE GRADO

# **Modelado y caracterización de mecanismos de envejecimiento en aislantes eléctricos.**

Autor

**Guillermo Cihuelo Puyuelo**

Director:

**Jorge Herrero Ciudad**

Ponente:

**Miguel García-Gracia**

Grado en Ingeniería Eléctrica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Departamento de Ingeniería Eléctrica

29-06-2018





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D. Guillermo Cihuelo Puyuelo, con nº de DNI 25208842Z en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza.

Declaro que el presente Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Eléctrica cuyo título es: Modelado y caracterización de mecanismos de envejecimientos de aislantes eléctricos es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 25 de Junio de 2018.

Fdo: Guillermo Cihuelo Puyuelo



## **Modelado y caracterización de mecanismos de envejecimiento en aislantes eléctricos.**

### **Resumen.**

En este trabajo se estudian distintas causas y efectos que dañan el aislamiento eléctrico, principalmente se estudia el efecto de la temperatura. Se presentan varias maneras de caracterizar el aislamiento del devanado de las máquinas eléctricas mediante diferentes pruebas experimentales basadas en los estándares que actualmente están en vigor.

Junto con estas pruebas se presenta una nueva forma de caracterizar, en el dominio de la frecuencia, el aislamiento del devanado de la máquina eléctrica mediante el aparato LCR.

Se realiza un estudio sobre qué valor es el idóneo para escoger la temperatura ambiente a la que trabaja la máquina y se crea un programa que permite obtener una temperatura equivalente anual o una temperatura equivalente en función del ciclo de trabajo de la máquina eléctrica.

Además, se presentan dos programas que permiten modelar la geometría de la máquina eléctrica y conocer, bajo ciertas condiciones definidas por el usuario, el punto y el valor de máxima temperatura en el aislamiento que envuelve a las bobinas del devanado de la máquina eléctrica.

Tras conocer el “*hot spot*” o punto caliente, la temperatura ambiente equivalente y el ciclo de trabajo se pretende controlar el envejecimiento del aislante dieléctrico de la máquina eléctrica que se encuentra bajo un estrés térmico.

.

## Índice

1.	Introducción. ....	5
1.1.	Aislante eléctrico. ....	5
1.2.	Comportamiento y estructura del condensador. ....	5
1.3.	Tipos de aislamiento en el devanado estático. ....	7
1.4.	Clases de aislamiento. ....	8
1.5.	Marco normativo. ....	9
2.	Estado del arte del aislamiento eléctrico. ....	11
2.1.	Materiales aislantes eléctricos. ....	11
2.2.	Tipos de materiales aislantes. ....	11
3.	Mecanismos de envejecimiento. ....	12
3.1.	Causas del envejecimiento. ....	13
3.1.1.	Temperatura. ....	13
3.1.2.	Tensión. ....	14
3.1.3.	Contaminación. ....	15
3.1.4.	Humedad. ....	16
3.1.5.	Deterioro mecánico. ....	16
3.2.	Efectos del envejecimiento. ....	17
3.2.1.	Descargas parciales. ....	17
3.2.2.	Vibraciones mecánicas. ....	19
3.2.3.	Corrientes por los rodamientos. ....	19
3.2.4.	Cortocircuitos. ....	20
4.	Técnicas experimentales para la caracterización del envejecimiento de un dieléctrico. ....	22
4.1.	Resistencia equivalente serie [ <b>RESR</b> ]. ....	23
4.2.	Tangente delta. ....	23
4.3.	Resistencia de aislamiento. ....	26
4.3.1.	Prueba de lectura puntual. ....	28
4.3.2.	Prueba de tiempo vs resistencia. ....	29
4.3.3.	Prueba de índice de polarización (IP). ....	30
4.3.4.	Prueba de escalón de tensión (SV). ....	31
4.3.5.	Prueba de rampa de tensión. ....	32
4.3.6.	Prueba de la absorción dieléctrica (DAR). ....	33
4.3.7.	Prueba de descarga dieléctrica (DD). ....	33

4.4.	Caracterización del envejecimiento del aislamiento eléctrico con el dispositivo LCR.	35
4.	Técnicas teóricas para modelar el envejecimiento de un dieléctrico.....	40
4.1.	Métodos de cálculo de vida útil. ....	40
	Método 1.....	40
	Método 2.....	41
	Método 3.....	41
	Método 4.....	41
4.2.	Influencia de la temperatura ambiente. ....	42
4.3.	Modelado del envejecimiento térmico del aislamiento de la máquina eléctrica.....	45
4.3.1.	Modelo de devanado de la máquina eléctrica con disposición de conductores alineada.	47
4.3.2.	Modelo de devanado de la máquina eléctrica con disposición de conductores en cruz.	50
4.3.3.	Modelo de la máquina eléctrica con imanes permanentes.....	51
4.4.	Envejecimiento según la temperatura máxima en el aislamiento.....	53
4.5.	Comprobación térmica experimental del funcionamiento del modelo FEMM térmico.	56
5.	Conclusión.....	58
6.	Próximos pasos.....	59
7.	Bibliografía. ....	60
8.	Tabla de figuras. ....	62
9.	Anexos.....	64
A.	Programa LUA de los devanados de la máquina eléctrica según la disposición de conductores.....	64
B.	Programa LUA de la máquina eléctrica de imanes permanentes.....	107
C.	Programa LUA "Ejecutar_1".....	128
D.	Programa LUA "Ejecutar_2".....	132
E.	Cálculo de temperatura ambiente por rangos de trabajo de la máquina eléctrica.....	138
F.	Materiales usados en las clases de aislamiento.....	140
G.	Comprobación térmica experimental del funcionamiento del modelo FEMM térmico aplicado a transformadores .....	141
H.	Fórmulas para el cálculo de la vida útil y control del envejecimiento.....	144

## 1. Introducción.

### 1.1. Aislante eléctrico.

Un aislante eléctrico es un material que dificulta la circulación de electricidad, es decir, tiene una escasa capacidad de conducción de la electricidad. Se utiliza para separar conductores eléctricos y para que se evite tocar accidentalmente una parte de un sistema eléctrico en tensión que pueda producir una descarga.

Su fundamento se basa en que existe una barrera de potencial que se establece entre la banda de valencia y la de conducción que dificulta la existencia de electrones libres capaces de conducir electricidad a través del material, tal y como se demuestra en la Figura 1.

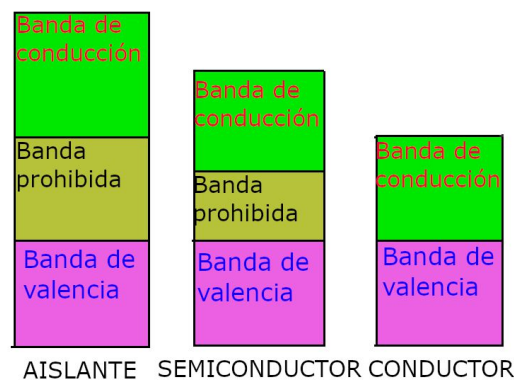


Figura 1.- Fundamentos del aislante.

### 1.2. Comportamiento y estructura del condensador.

El comportamiento eléctrico del condensador, cuyo circuito equivalente se muestra en la Figura 2, está definido por los distintos elementos.

- La capacidad efectiva del condensador,  $C$ .
- La autoinductancia del condensador debido a los terminales, electrodos y la geometría,  $L$ .
- La resistencia en paralelo que es la resistencia por donde circula la intensidad de fuga,  $R_P$ .
- La resistencia equivalente en serie que es debida a la unión entre el papel y el óxido,  $R_{ESR}$  (Equivalent Series Resistance).



- En esta resistencia se disipa la potencia activa del condensador siendo la causa de su calentamiento.

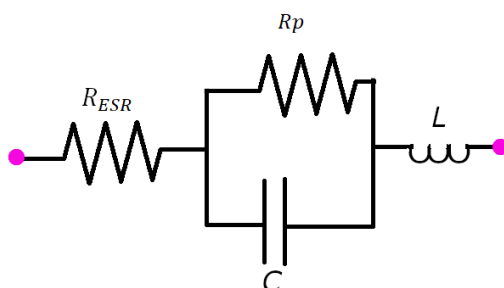


Figura 2-. Comportamiento interno de un condensador.

El comportamiento de la impedancia del condensador varía con la frecuencia; a frecuencias bajas predomina la componente capacitiva, cuando la frecuencia es igual a la frecuencia de resonancia predomina la componente resistiva ya que la inductancia y la capacidad se compensan y, a frecuencias altas, predomina la impedancia de carácter inductivo. Este comportamiento se muestra en la Figura 3.

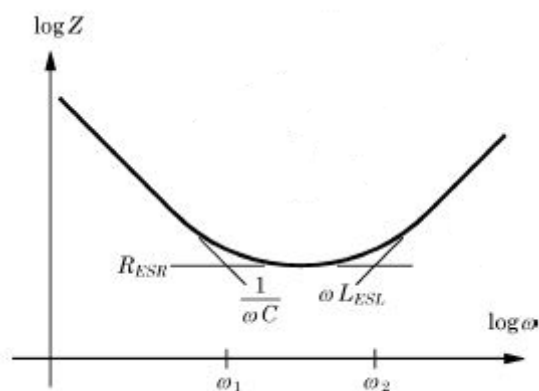


Figura 3.- Comportamiento del condensador según la frecuencia.[1]

Para la caracterización del aislamiento, se ha utilizado el dispositivo LCR 6300, Figura 4. El LCR permite medir valores resistivos, inductivos y capacitivos en función de la frecuencia (hasta 300 kHz). El procedimiento seguido para caracterizar el aislamiento se muestra en el apartado 4.4.



Figura 4.- Aparato LCR 6300 de 4Fores.

### 1.3. Tipos de aislamiento en el devanado estático.

En la Figura 5 se pueden observar los diferentes tipos de aislamiento que puede tener un conductor activo a su alrededor. Entre ellos se encuentran los siguientes:

- **Aislamiento de hilo.**

Es el recubrimiento exterior de cada hilo conductor que forma una espira. En el caso de hilos magnéticos, se trata del esmalte con el que se fabrica.

- **Aislamiento de espira.**

Es el aislante que recubre una espira. Se utiliza cuando las espiras están formadas de varios conductores. Si este aislamiento separa bobinas de diferentes fases, este aislamiento tendrá mayor rigidez dieléctrica. Normalmente, están formados por laminados fabricados a partir de polímeros termoendurecibles, aunque en la actualidad se aplican recubrimientos termoplásticos.

- **Aislamiento a tierra.**

Es el aislamiento que impide que las fases del devanado tengan contacto con las paredes metálicas de las ranuras del estator. Normalmente, se suele utilizar papel de mica combinado con algún tipo de resina o directamente resinas sintéticas líquidas termoendurecibles como el poliéster o la resina epoxi.

- **Cubierta semiconductora.**

Se trata de una capa que cubre la superficie de las bobinas del estator para prevenir descargas parciales, rellenando los espacios de aire entre las bobinas y el núcleo. Esta capa se encuentra únicamente en máquinas de AT en devanados preformados.



*Figura 5.- Tipos de aislamiento en los conductores activos. [2]*

#### **1.4.Clases de aislamiento.**

Las clases de aislamiento se clasifican según la temperatura máxima que pueden soportar. Es en la Tabla 1 dónde se resumen las clases de aislantes según su temperatura máxima de trabajo y de dónde se obtienen las temperaturas máximas para el apartado 4.1, dónde se calcula, según el método escogido, la vida útil del aislamiento.

Tabla 1.- Tipos de aislamiento en función de su temperatura máxima.[3]

Tipo de aislamiento	Temperatura máxima	Incremento máximo
Clase A	105 °C	65 °C
Clase E	120 °C	80 °C
Clase B	130 °C	90 °C
Clase F	155 °C	115 °C
Clase H	180 °C	140 °C
Clase N	200 °C	160 °C
Clase R	220 °C	180°C

### 1.5.Marco normativo.

Los principales estándares que se han tenido en cuenta para la caracterización de mecanismos de envejecimiento en aislantes eléctricos en la realización de este proyecto son, de forma resumida, los siguientes:

- *IEEE 286. Recommended for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.*[4]

Se describe el factor de potencia y la variación del factor de potencia del aislamiento de una bobina y además, se especifica el procedimiento a seguir para realizar la medida de dicha variable.

- *IEEE 1553-2002. Trial-Use Standard for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators.*[5]

Se definen los parámetros y el número de muestras para la prueba de resistencia a alta tensión. Además, se define el criterio de aceptación y el procedimiento para experimentar el fallo prematuro durante la prueba de resistencia al voltaje.

- *IEEE 1043. Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils.*[6]

En el estándar 1043 se detallan consideraciones a tener en cuenta en la prueba de resistencia al voltaje para bobinas y barras preformadas. También se especifica el procedimiento de la prueba y el análisis e interpretación de los resultados obtenidos de las pruebas.

- *IEEE 43.Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery.*[7]

Se describe el procedimiento recomendado para la medida de la resistencia de aislamiento y la forma correcta de interpretar los resultados.

- *IEE 522. Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines.*[5]

Se definen las pruebas de impulso aplicadas a los devanados de la máquina eléctrica y se presentan los niveles de prueba de impulso sugeridos para varios tipos de máquinas eléctricas. Además, se recoge una recomendación de que aparatos escoger para la medición de dichos impulsos.

- *IEC 60076-12:2008. Loading guide for dry-type power transformer.*[8]

Se tiene en cuenta únicamente un estudio de cómo varía la vida útil de la máquina eléctrica con respecto a las clases de aislamiento térmico de los devanados de un transformador.

## **2. Estado del arte del aislamiento eléctrico.**

El estado del arte que se presenta hace referencia a los antecedentes y a la actualidad de los materiales utilizados para aislar eléctricamente los conductores de las máquinas eléctricas.

### **2.1. Materiales aislantes eléctricos.**

Un material de aislamiento presenta una conductividad eléctrica muy baja y no permite la circulación libre de corriente. Su selección depende de los materiales disponibles, las necesidades técnicas del motor o generador y de los costes relativos de los procesos de fabricación.

Los primeros materiales aislantes fueron las fibras naturales de celulosa, cuero y lana. Posteriormente, se utilizaron las resinas naturales combinadas con fibras.

En la actualidad, en las máquinas rotativas se utilizan materiales sintéticos, como por ejemplo: los barnices; que se utilizan para revestir las bobinas después de realizar la inmersión. También se utilizan resinas sintéticas sin disolvente; las cuales son termoestables bajo la acción del calor, catalizadores, endurecedores, o radiación. La eliminación de disolventes hace de su aplicación más respetuosa con el medio ambiente y hace menos probable que se formen huecos en el aislamiento de tierra.

Los más utilizados son los poliésteres, las siliconas, las resinas epoxi, el poliuretano, el polipropileno y el policarbonato.

### **2.2. Tipos de materiales aislantes.**

Se ha realizado un análisis exhaustivo de documentos sobre los tipos de materiales aislantes que se han utilizado en la industria y en la referencia [9] de la bibliografía, se presenta una recopilación de materiales sados para aislar eléctricamente los conductores activos.

### 3. Mecanismos de envejecimiento.

Al envejecer, el aislamiento se encoje y se vuelve quebradizo dando lugar a grietas. Al debilitamiento del aislamiento con el paso del tiempo se le denomina envejecimiento.

Por una parte, existen mecanismos que ayudan al envejecimiento prematuro del sistema de aislamiento de la máquina como pueden ser, principalmente, la temperatura y la tensión.

Por otra parte, se puede distinguir un envejecimiento natural en el que la máquina está funcionando en condiciones nominales y el fallo ocurre tras un envejecimiento constante y, un envejecimiento forzado o acelerado, en el que la máquina trabaja por encima de sus condiciones nominales recortando su vida útil.

Como se puede ver en la Figura 6, el 66% de las veces que falla la máquina eléctrica se debe a que se produce un fallo en el estator de la máquina, principalmente fallos derivados de roturas del aislamiento que envuelve el devanado.

La mayoría de los fallos que se producen en el estator son por fallas de aislamiento, por ejemplo en la Figura 7 se observa un fallo del aislamiento a tierra por exceso de temperatura. Se plantea la necesidad de disminuir la tasa de fallos de la máquina eléctrica y controlar el envejecimiento de sus aislantes.

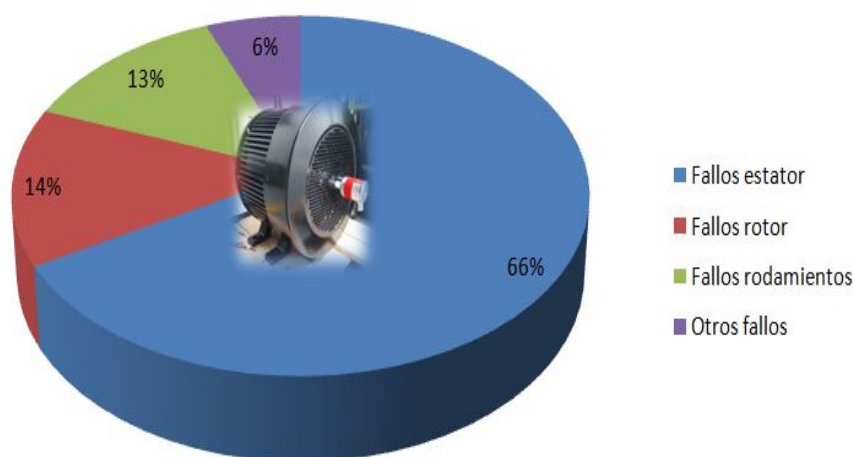


Figura 6.- Porcentaje de fallos de la máquina eléctrica.

### **3.1.Causas del envejecimiento.**

Las principales causas por las que falla una máquina eléctrica se encuentran en la

#### **3.1.1. Temperatura.**

El envejecimiento por temperatura se produce en cualquier máquina eléctrica y es la causa más común por la que aparecen averías en el estator. Se suele denominar también como la causa principal del deterioro de la máquina ya que es producida por el efecto Joule, que se produce por la circulación de corriente por los devanados.

La temperatura del aislamiento se debe encontrar por encima de la temperatura mínima ya que ayudará a que en el aislamiento no exista humedad y disminuya el tamaño de los huecos creados en el proceso de impregnación.

La temperatura del aislamiento dependerá de la temperatura del ambiente,  $T_{amb}$ , y de la variación de temperatura del aislamiento debido al calor generado por los conductores activos del estator,  $\Delta T$ . Tal y como se muestra en (1).

$$T = T_{amb} + \Delta T \quad (1)$$

Cuanta mayor sea la temperatura,  $T$ , mayor es la velocidad de la reacción química, y por lo tanto, más rápido se deteriora el aislamiento. Si la temperatura es muy elevada, puede llegar a producirse una ruptura del aislamiento de los conductores, tal y como se muestra en la Figura 7.[9]

Es común que se produzca un aumento rápido de la temperatura en los conductores, produciendo una expansión de los mismos tan rápida que no le da tiempo al aislamiento a expandirse a la vez que el conductor por tener un coeficiente de expansión térmico menor. Esto ocasiona sobreesfuerzos entre el conductor y el aislante produciendo que parte del recubrimiento aislante se desprenda.

Se deduce que el aislamiento eléctrico colocado debería tener mayor capacidad térmica que la máxima temperatura de funcionamiento para evitar este efecto tan indeseado.



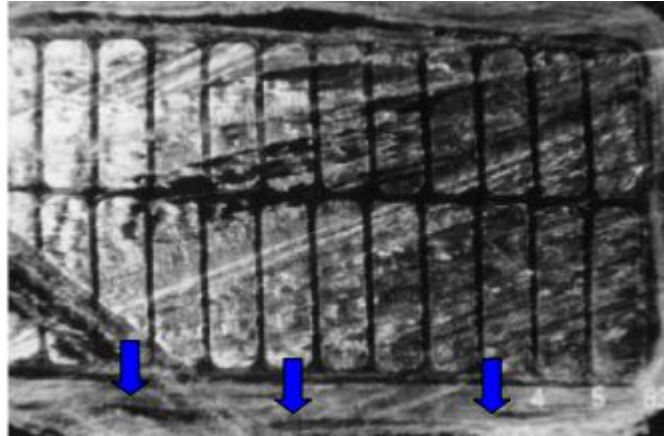


Figura 7.- Deterioro experimental del aislante de tierra por excesiva temperatura.[9]

### 3.1.2. Tensión.

Los efectos de la tensión dependen del nivel máximo que alcanzan y también de la pendiente de subida  $\frac{dV}{dt}$  de la variación de tensión o impulso.

En la Figura 8 se muestra un esquema de un pico de tensión y las variables que lo definen, dónde  $U_p$  es la tensión máxima de pico y  $U_B$  es la sobretensión producida de la tensión normal  $U_S$ . Se denomina  $\frac{dV}{dt}$  a la pendiente de la recta comprendida entre  $0.1 \cdot U_p$  y  $0.9 \cdot U_p$  de la onda de un pulso de tensión.

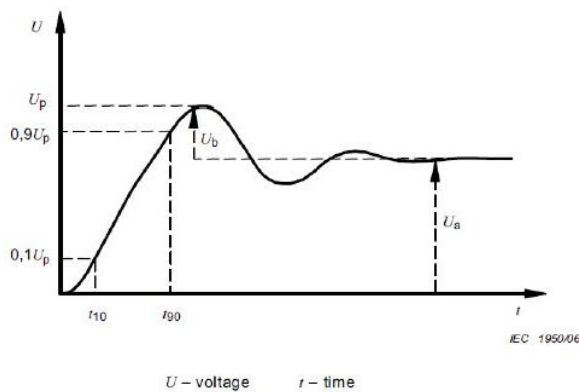


Figura 8.- Pico de tensión.[10]

Considerando que se alimenta con un convertidor, los valores típicos de  $\frac{dV}{dt}$  a la salida del convertidor varían entre 3 y 5 kV por microsegundo.

Aunque, en las nuevas tecnologías basadas en semiconductores de gran ancho de banda como son el SiC o el GaN, la variación permitida puede ser todavía mayor. La Figura 9 muestra un pico real de tensión producido a la salida de un puente en H constituido por transistores GaN. En este ejemplo se alcanzan los 0.82 kV por microsegundo.

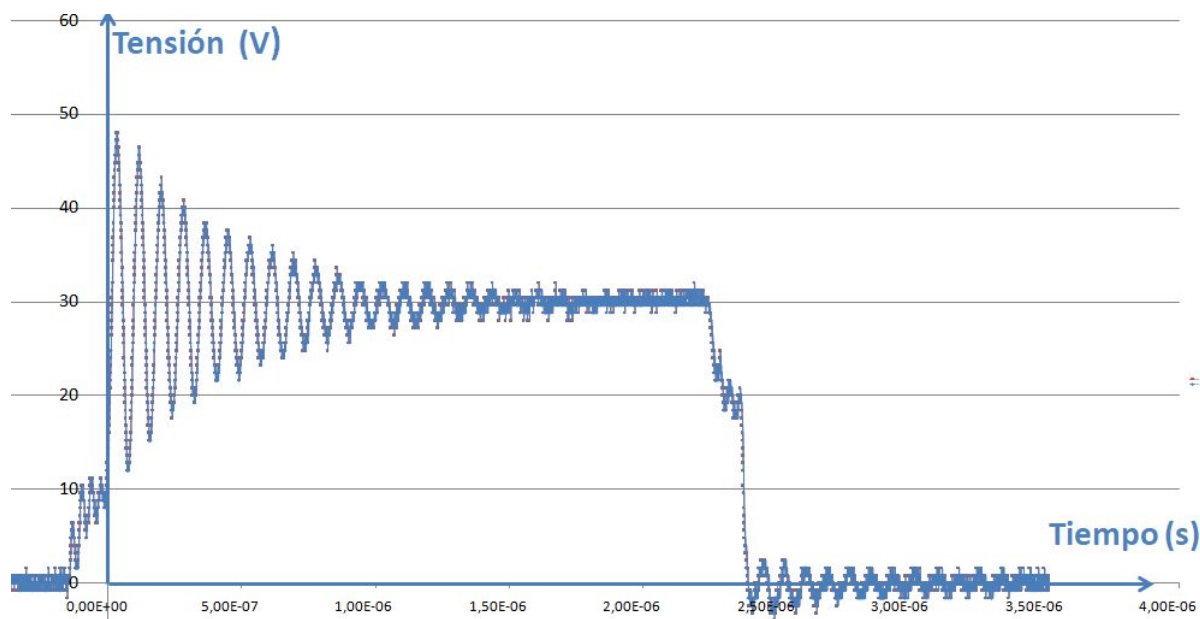


Figura 9. Medida de pico de tensión en transistores GaN trabajando en puente en H con 100 ohmios de carga, a 210 kHz y 30 V de tensión de entrada.

Estos picos se deben a la rápida conmutación de los transistores de los convertidores que produce la onda PWM con alto  $\frac{dV}{dt}$  y son uno de los principales factores que afectan al estrés eléctrico. Además, producen una distribución no uniforme de tensión a través del bobinado siendo la caída de tensión en las primeras vueltas de las espiras mayores que en el resto lo que daña de forma importante al aislamiento.

También pueden producir una ionización de las moléculas de aire que se encuentran en el interior del aislamiento, creando así la posibilidad de que se produzcan descargas parciales. A estas moléculas de aire también se le pueden denominar vacuolas o huecos.

### 3.1.3. Contaminación.

La contaminación es un problema que produce el deterioro por partículas abrasivas (p.e, arena) o ataque químico. Además, puede producir que se creen corrientes por la superficie del aislante causando una tensión de cortocircuito a tierra.

Este efecto, se da principalmente en máquinas de alta tensión que deben estar refrigeradas por aire ya que el aire, dependiendo en el entorno en donde se encuentre, puede llevar con él diferentes contaminantes (arena, insectos, agua, suciedad, etc).

Con la refrigeración por aire se produce un aporte de oxígeno a la máquina y, si se están generando descargas parciales, éstas darán lugar a la creación de ozono, el cual es muy

reactivo y combinado con otros gases puede resultar muy perjudicial para los materiales de la máquina.

Esta contaminación junto con la humedad del ambiente puede llevar a crear una capa que sea conductora de electricidad.

#### **3.1.4. Humedad.**

Según el nivel de humedad de la superficie en el aislante se modifica el nivel de aislamiento, de forma que, si los devanados han absorbido humedad, la tensión de ruptura del dieléctrico disminuye, y por lo tanto, el aislamiento se perfora a valores de tensión inferiores a los que se esperan.

Para eliminar la humedad en los devanados de la máquina eléctrica se considera la siguiente opción:

- Colocar los devanados en un horno con control de temperatura y circulación de aire adecuados. Para ello también se pueden utilizar bancos de lámparas infrarrojas si no está disponible el horno o se puede construir una caseta conveniente alrededor de la máquina y usar serpentines de vapor o resistencia eléctrica como fuente de calor. En esta caseta se deben proveer aberturas para la circulación libre del aire. El caudal de aire se puede ampliar mediante ventiladores.

#### **3.1.5. Deterioro mecánico.**

Las principales fuentes de estrés mecánico son:

- El sistema de aislamiento del rotor está sometido a una fuerza centrífuga la cual deteriora el material.
- Los campos magnéticos que se generan debido a la corriente hacen vibrar a las bobinas en las ranuras, erosionando el aislante que terminan en averías antes de completar el ciclo de vida. Esto normalmente se produce en las terminaciones de los devanados.

### 3.2.Efectos del envejecimiento.

Debido a las maniobras en la red, las variaciones bruscas de carga y a causas atmosféricas las máquinas eléctricas, lo mismo que el resto de la aparamenta eléctrica, están sometidas a sobretensiones que afectan a la vida útil de los sistemas de aislamiento.

La alta rigidez dieléctrica de estos sistemas de aislamiento les permite soportar altos niveles de tensión mientras mantienen, sostienen y separan los conductores y zonas activas de las máquinas eléctricas. Aunque debido a esfuerzos térmicos, mecánicos y factores ambientales o químicos, esta propiedad de los sistemas de aislamiento disminuye con el tiempo, lo que propicia el envejecimiento y un posterior fallo.

#### 3.2.1. Descargas parciales.

Las descargas parciales, (DP), son fenómenos de ionización gaseosa transitoria producidos por el exceso de campo eléctrico cuando se aplica sobre vacuolas de aire o gas presentes en un sistema de aislamiento, ya sea en el interior de dieléctricos sólidos, en interfaces dentro de dieléctricos sólidos o líquidos, o en burbujas dentro de aislantes líquidos. Inicialmente, las DP no afectan a la totalidad del aislante, pero su persistencia produce un deterioro gradual del aislamiento a través de la generación de árboles eléctricos, hasta provocar el fallo del dieléctrico.

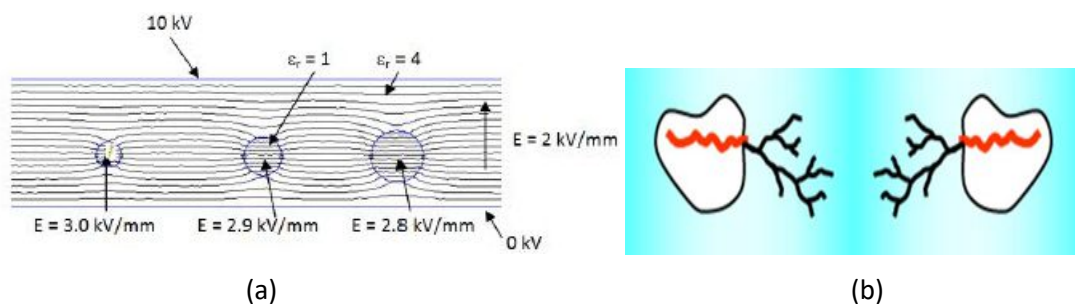


Figura 10. (a) Huecos de aire dentro de la capa del aislante sometidos a un campo eléctrico.[9] (b) Generación de árboles eléctricos en el aislante.

Sin hueco, el aislamiento se comporta como un condensador C. Cuando el hueco está presente, se tienen tres capacidades en serie como se representa en la Figura 11. En el área del hueco es donde el campo eléctrico puede superar la tensión de ruptura y producir descargas parciales.

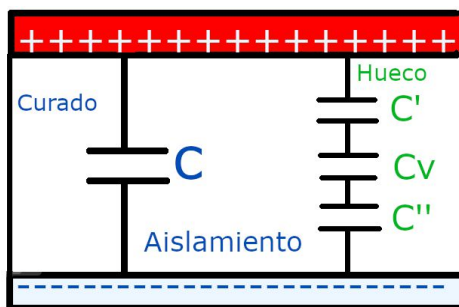


Figura 11.- Comportamiento de un hueco en el aislante.

En un aislante sometido a una tensión aparece un campo eléctrico,  $E_A$ , que se distribuye uniformemente si el material es perfecto y homogéneo. En el caso de un aislante con imperfecciones, Figura 10, el campo aumentara dentro de los defectos o vacuolas.

Este proceso degenerativo es poco predecible en el tiempo, aunque tiene efectos que pueden ser observables y permiten la detección y evaluación del aislamiento:

- Transferencia de carga eléctrica mediante métodos de detección eléctrica.
- Fuerte aumento local de la temperatura en el lugar donde se produce la descarga (detectores de temperatura resistiva e infrarroja).
- Pérdidas dieléctricas (medida de  $\tan \delta$  y capacidad).
- Radiación visible y ultravioleta (métodos de detección óptica).
- Emisión de radiación electromagnética en todo el espectro de frecuencias (métodos de detección basados en el empleo de antenas).
- Vibraciones provocadas por las ondas de presión que se desplazan dentro del aislamiento (métodos de detección acústica).
- Generación de gases como el ozono, hidrogeno (métodos de detección por análisis de gases).

Existen tres tipos de DP de acuerdo a su origen: internas, superficiales y de corona. La DP de tipo interno ocurre por dentro de máquinas por defectos en los materiales, como en el polietileno, la resina, el papel o la mica; las descargas superficiales ocurren en los pasa-tapas, terminales de cables o en la superficie de los devanados de los generadores y las de corona ocurren en los bordes afilados de las máquinas, los tornillos o pernos de los cables.

### 3.2.2. Vibraciones mecánicas.

Una corriente alterna en una espira produce un campo magnético. Cuando dos espiras están cerca una de otra, las fuerzas de Laplace aparecen entre estas dos espiras al doble de frecuencia de la corriente alterna. Con las máquinas eléctricas usando corriente alterna a 50 Hz cualquier espira está bajo una fuerza alterna de 100 Hz. Aunque esta fuerza alterna sea baja en amplitud, existe durante toda la esperanza de vida.

En el caso de la resina epoxi, el parámetro más importante sobre es la temperatura de transición vítrea  $T_g$ . Cuando la temperatura de la resina epoxi es menor que  $T_g$ , la resina epoxi es considerada como un material duro. Mientras que si la temperatura es superior a  $T_g$ , el material comienza a ser blando, y más precisamente, aumenta su capacidad de absorber vibración.

Cuando se les somete a bajas vibraciones a dos grupos de bobinas, cuyas corrientes están corrientemente orientadas, aparecen dos fuerzas mecánicas en el devanado de una máquina eléctrica. La primera fuerza, representada en la Figura 12 mediante las flechas azules, es inducida por las hebras de la misma bobina creando una fuerza de atracción entre ellas. Mientras que la segunda fuerza, representada en la Figura 12 mediante las flechas verdes, es una fuerza de repulsión entre las hebras de diferentes bobinas.

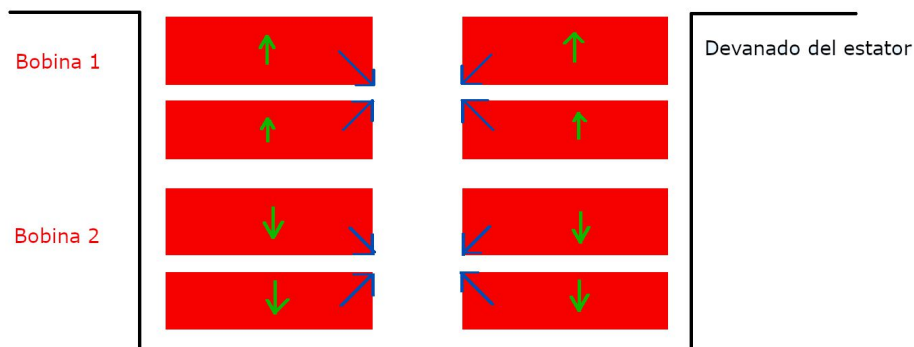


Figura 12. Fuerzas producidas por bajas vibraciones en un par de bobinas de un devanado de un estator.

### 3.2.3. Corrientes por los rodamientos.

Las corrientes por los rodamientos son tan antiguas como las propias máquinas eléctricas, sin embargo, los daños, por esta razón, han tomado cierta relevancia durante los últimos años. Ello es debido a los convertidores y las altas frecuencias de conmutación que emplean. Se produce una tensión en el eje de la máquina eléctrica rotativa que provoca una corriente de alta frecuencia en los rodamientos que puede derivar en un fallo prematuro de estos.

Para una tensión dada en el eje, las características de impedancia de los cojinetes determinan, en gran medida, la corriente resultante que circula por el rodamiento. Las maquinas eléctricas rotativas tienen tres fuentes básicas que originan tensión en el eje:

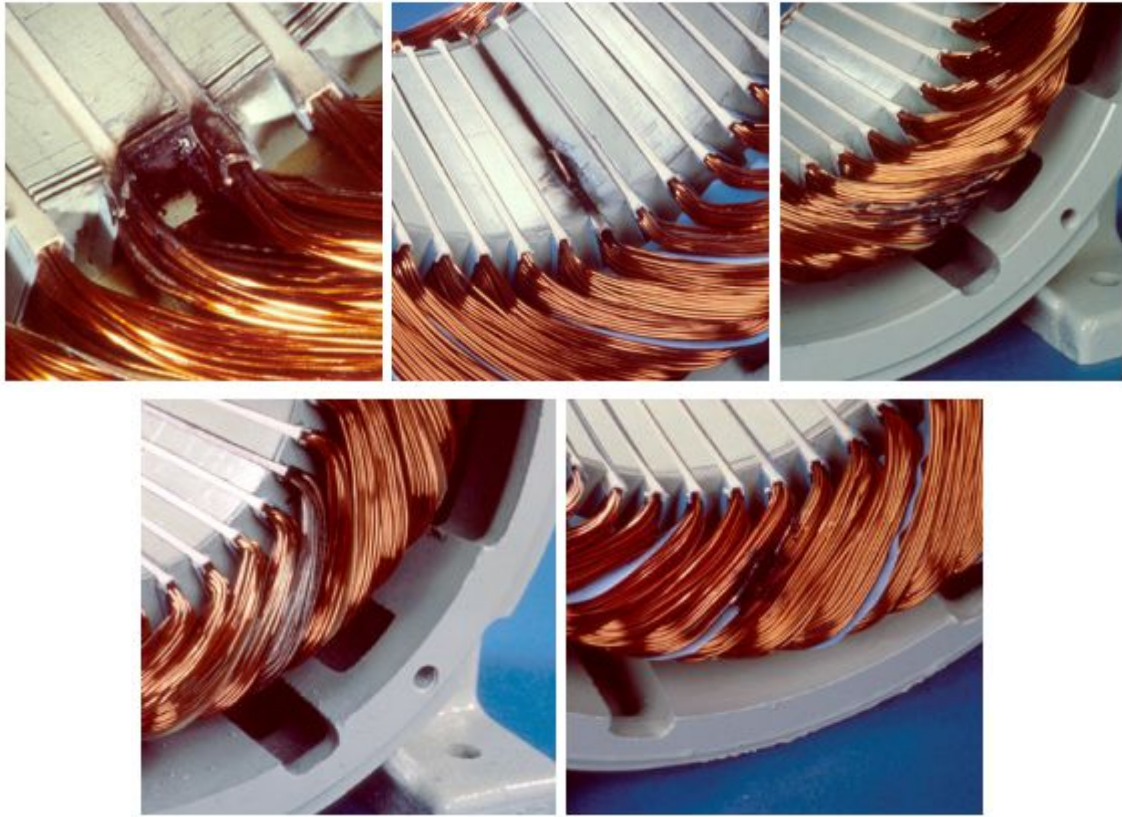
- La inducción electromagnética desde el devanado del estator al eje del rotor. Debido a pequeñas asimetrías del campo magnético en el entrehierro.
- Acoplamiento electrostático de fuentes internas. Se registra en motores donde se puede dar la acumulación de carga del rotor (el aire ionizado pasa sobre las aspas del ventilador del rotor).
- Acoplamiento electrostático de fuentes externas como PWM del inversor. La presencia de una elevada  $\frac{dV}{dt}$  a través del neutro del estator a la tierra del bastidor provoca una tensión a tierra. La onda de tensión PWM es indeseable y da lugar a un fracaso prematuro del cojinete.

La causa fundamental de la tensión en el eje es la asimetría magnética entre el estator y el rotor o posiblemente un desplazamiento de fase de la forma de onda de tensión del motor. El sistema de tierra también puede contribuir a esta condición a través de la tensión desequilibrada del sistema.

#### **3.2.4. Cortocircuitos.**

Los cortocircuitos normalmente son producidos cuando alguno de los efectos anteriores produce una falla en el aislamiento y conecta una parte conductora activa con una parte de potencial cero o diferente.

En la Figura 13 se muestran diferentes imágenes de los cortocircuitos producidos en un devanado. En la primera imagen se produce un cortocircuito fase-tierra en el extremo de la ranura, en la segunda imagen, un cortocircuito fase-tierra en la ranura, en la tercera imagen se produce un cortocircuito entre espiras, en la cuarta imagen, se produce un cortocircuito entre bobinas de la misma fase y en la última un cortocircuito entre fases.



*Figura 13.- Ejemplos de cortocircuitos y fallos en el devanado.*



#### 4. Técnicas experimentales para la caracterización del envejecimiento de un dieléctrico.

El objetivo es la caracterización del aislamiento: evaluar la condición y calidad del sistema aislante, revelar la contaminación, fracturas y perforaciones en dicho sistema.

La suposición considerada en el presente proyecto es que el aislante eléctrico y el condensador, aunque funcionalmente son distintos, son físicamente equivalentes (conductores separados por un medio dieléctrico) y, por tanto, se comportan de un modo similar.

La Figura 14 representa un esquema sobre las técnicas que se estudiarán para la caracterización del envejecimiento del aislamiento según diferentes mecanismos, (p.e. frecuencia, temperatura).

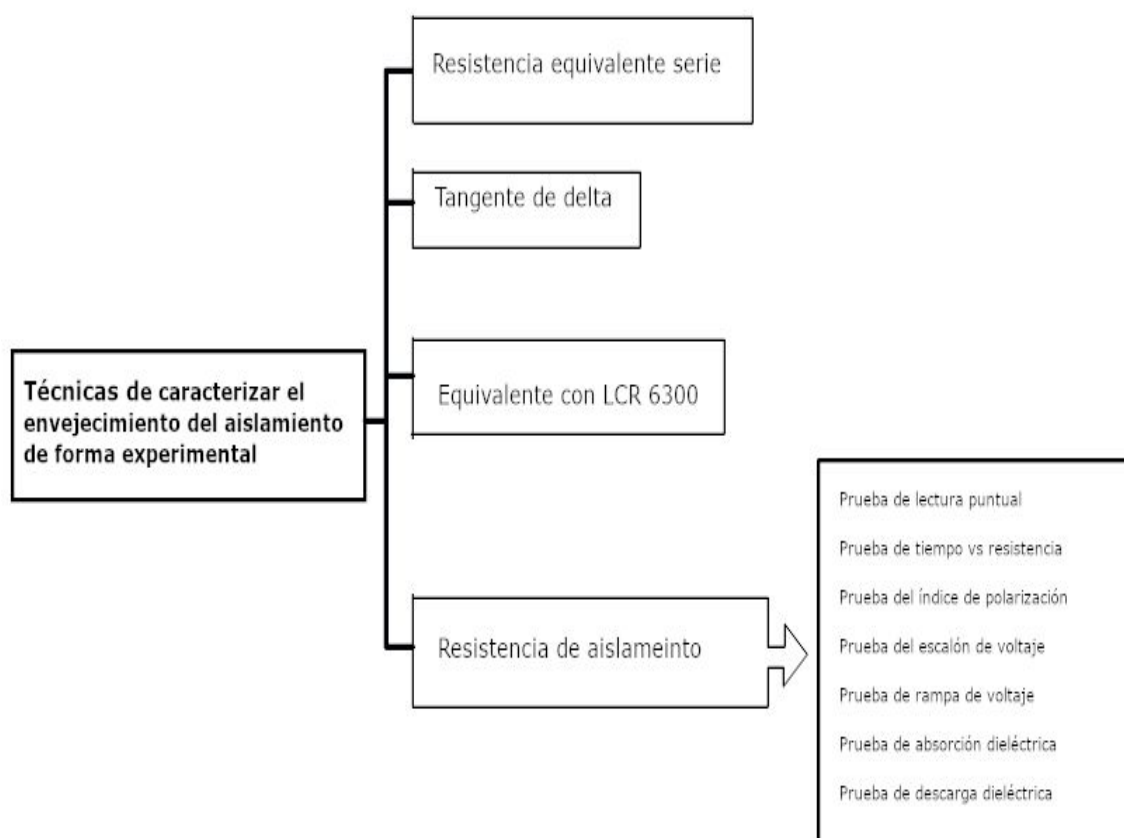


Figura 14.-Técnicas para la caracterización del envejecimiento del aislamiento.

#### 4.1. Resistencia equivalente serie [ $R_{ESR}$ ].

La resistencia equivalente serie del condensador aumenta conforme disminuye el volumen del electrolito, el cual es reducido por la vaporización producida tras su utilización. Esta disminución se puede dimensionar mediante (2).

$$R_{ESR} = \frac{R_{ESR_0}}{V} \quad (2)$$

dónde  $R_{ESR_0}$  es la resistencia equivalente serie inicial y  $V$  el volumen del electrolito. El envejecimiento de  $R_{ESR}$  se muestra en la Figura 15.

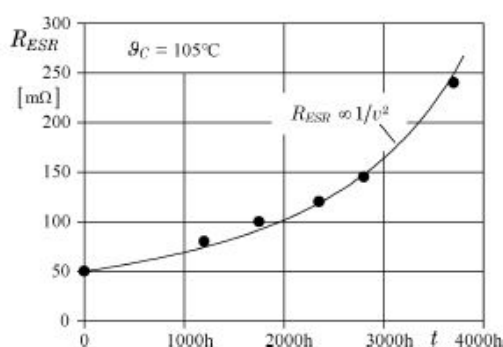


Figura 15.- Gráfica donde se recogen los resultados experimentales de la prueba de la resistencia equivalente serie con el tiempo. [1]

El condensador se encuentra al final de su vida útil cuando la  $R_{ESR}$  haya alcanzado unas pérdidas del 30%-40% de su valor nominal (3), es decir, cuando  $R_{ESR}$  llegue a ser menor que el 60% de su valor inicial.

$$R_{ESR} < 0.6 \cdot R_{ESR_0} \quad (3)$$

#### 4.2. Tangente delta.

Al actuar el campo eléctrico sobre cualquier dieléctrico se produce una disipación de cantidad de energía eléctrica que se transforma en calor, la cual es proporcional al cuadrado de la tensión  $V$  aplicada al dieléctrico, como se muestra en (4).

$$P = V \cdot I_R = V \cdot I_C \cdot \tan \delta = V^2 \cdot C \cdot \omega \cdot \tan \delta \quad (4)$$

donde, la  $I_C$  es la corriente por el condensador y la  $I_R$  es la intensidad que circula por la resistencia en paralelo con el condensador;  $C$  es la capacidad,  $\omega$  la frecuencia angular.

La tangente de pérdidas,  $\tan \delta$ , es la relación entre la parte resistiva de la corriente total, la cual es proporcional al estado del aislamiento, y la parte capacitiva de la corriente total, la cual es constante en el tiempo. Se obtiene en la Figura 16 la definición de tangente  $\delta$  y la ecuación de la potencia disipada en (4).

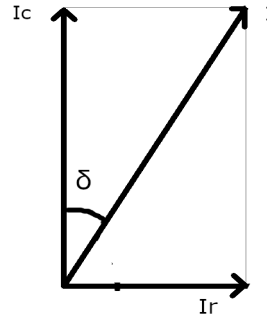


Figura 16. Definición de la tangente de  $\delta$ .

Los valores de  $\delta$  no son constantes, dependen de la frecuencia de trabajo,  $\omega$  y teniendo en cuenta (4) se tiene que:

$$\tan \delta = \frac{Ir}{Ic} = \frac{1}{\frac{V^2}{P} \cdot C \cdot \omega} = \frac{1}{Rp \cdot Cp \cdot \omega} = \omega \cdot Rs \cdot Cs \quad (5)$$

Es decir, según(5), se puede calcular la tangente delta conociendo el circuito equivalente de una resistencia con un condensador en paralelo o el circuito equivalente con un condensador y una resistencia en serie.

La inclinación de la  $\tan \delta$  se define como la diferencia en el factor de potencia dieléctrico del aislamiento medido a dos tensiones,  $V1$  y  $V2$ .

$$\Delta \tan \delta = \tan \delta_{V2} - \tan \delta_{V1} \quad (6)$$

Un cambio en la inclinación del factor de potencia durante un período de tiempo puede ser una indicación de cambio en la condición del aislamiento de la bobina.

Además, el factor de disipación, (FD),  $\tan \delta$ , y el factor de potencia, (FP), se pueden convertir el uno en el otro mediante las ecuaciones (7) y (8).

$$FP = \frac{FD}{\sqrt{1 + FD^2}} \quad (7)$$

$$FD = \frac{FP}{\sqrt{1 - FP^2}} \quad (8)$$

Para poder interpretar los resultados de la prueba se procede a establecer las siguientes indicaciones:

- El valor inicial del factor de potencia se usa para determinar el estado de curado del sistema de aislamiento.
- El aumento del valor de factor de potencia al aplicar un aumento de voltaje es el fenómeno normal que indica una mayor descarga parcial en los huecos.
- La variación de la inclinación del factor de potencia o “*tip-up*” entre muestras del mismo fabricante, si son bobinas, se deben a la creación de distintos huecos en el proceso de impregnación.
- El aumento del factor de potencia y de la inclinación del factor de potencia no puede considerarse como una indicación absoluta de la condición de aislamiento de la bobina.
- Un valor de inclinación o “*tip-up*” bajo indica la calidad de construcción y compacidad (falta de inclusiones gaseosas o huecos).

El factor de potencia medido a una tensión baja no se ve afectado por descargas parciales por lo que es una indicación de:

- Pérdidas dieléctricas inherentes del aislamiento y su estado general.
- Calidad del contacto de la superficie semiconductor con el núcleo.
- Contenido de humedad y grado de limpieza.
- El grado de curado de los materiales.

**4.3.Resistencia de aislamiento.**Con la prueba de resistencia de aislamiento se obtiene información sobre el estado de deterioro del aislamiento, se predicen fallos en el sistema y se realiza, normalmente, en alta tensión continua entre conductores activos, entre un conductor activo y otro de neutro sin tensión y, entre un conductor activo y otro de tierra sin tensión para hacer más evidente la corriente de fuga o por si existe la posibilidad de formación de arcos bajo unas condiciones controladas de prueba.

La resistencia de aislamiento, la cual puede llegar a ser del orden de los TΩ, muestra la calidad del aislamiento y proporciona una buena indicación sobre los riesgos de circulación de las corrientes de fuga.

Con un megaóhmetro se puede medir la corriente total que varía con el tiempo, y, mediante la ley de Ohm(9), se puede obtener la resistencia de aislamiento.

$$V = I \cdot R \quad (9)$$

dónde  $V$  es tensión,  $I$  es corriente y  $R$  es la resistencia de aislamiento.

Esto se debe a que al estar la corriente total formada por varios tipos de corriente; la corriente de carga capacitiva, la corriente de absorción o polarización y la corriente de conducción o de fuga, no se puede realizar una medida de resistencia de aislamiento fiable ya que la corriente varía con respecto al tiempo, tal y como se muestra en la Figura 17.

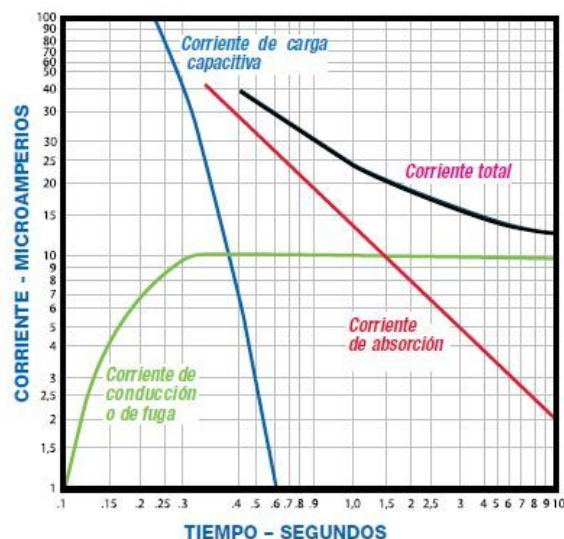


Figura 17.- Componentes y valor de la corriente total por el aislamiento.[11]

Por lo que hace falta un criterio para saber cuál es el valor adecuado de la resistencia y así caracterizar el aislamiento.



Las pruebas que se pueden realizar para caracterizar el aislamiento se presentan a continuación [11]:

#### 4.3.1. Prueba de lectura puntual.

Se caracteriza el aislamiento con esta prueba de dos formas: la primera, mediante un único valor de resistencia de aislamiento y la segunda, mediante el estudio de la evolución temporal de la resistencia de aislamiento.

- Lectura puntual de la resistencia de aislamiento.

Se realiza una única medida de la resistencia tras aplicar el voltaje de prueba durante un periodo de tiempo de 1 minuto. Este tiempo mínimo de 1 minuto es el tiempo que tarda la corriente de carga capacitiva en desaparecer.

Este valor de resistencia de aislamiento se compara con los valores mínimos que los estándares ofrecen para saber si el aislamiento cumple la resistencia mínima, los cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.- Valor de resistencia mínimo según la muestra de prueba.[7]

Resistencia mínima del aislamiento (M $\Omega$ )	Muestra de prueba
kV*+1	Devanados de antes de 1970 y devanados de campo.
100	Armaduras de CC y bobinas preformadas.
5	Mayoría de las bobinas con bobinas del estator bobinadas al azar y bobinas preformadas con rango inferior a 1 kV.

dónde kV\* es la tensión nominal de la máquina eléctrica kV.[7]

- Seguimiento del valor de la resistencia de aislamiento.

De forma complementaria, se puede medir la evolución temporal de la resistencia de aislamiento durante un largo periodo de tiempo (meses) y crear una tendencia. Esta tendencia aporta información sobre los problemas futuros.

Para poder caracterizar el envejecimiento del aislamiento se pueden seguir las siguientes consideraciones:

- Si los valores de resistencia son de aceptables a altos y se mantienen constantes: No es causa de preocupación, el aislamiento se encuentra en buen estado.

- Si los valores de resistencia son de aceptables a altos, pero con una tendencia constante hacia valores más bajos: Localizar y remediar la causa y verificar la tendencia decreciente.
- Si los valores de resistencia son bajos, pero se mantienen constantes: Las condiciones probablemente estén bien pero debe verificarse la causa de los valores bajos. Tal vez sea simplemente el tipo de aislamiento utilizado.
- Si los valores son tan bajos, pero como para no ser seguros: Limpiar y secar, o elevar los valores de otra manera antes de volver a poner el equipo en servicio. Probar mientras se va secando.
- Si los valores son aceptables o altos y previamente se mantienen constantes, pero bajan drásticamente: Realizar pruebas a intervalos frecuentes hasta que la causa de los valores bajos se localice y se remedie o, hasta que los valores se estabilicen a un nivel más bajo pero seguro para la operación o, hasta que los valores sean tan bajos que sea inseguro mantener el equipo en operación.

La resistencia de aislamiento depende fuertemente de la temperatura por lo que se debe corregir a una temperatura estándar igual a 40°C mediante un factor de corrección  $K_T$  que depende del sistema de aislamiento.[7]

#### **4.3.2. Prueba de tiempo vs resistencia.**

El aislamiento durante los primeros 10 minutos de la aplicación de la alimentación con el voltaje de prueba se “carga” debido al movimiento de los electrones, los cuales crean una corriente.

En esta prueba se leen valores sucesivos de resistencia de aislamiento durante el periodo de 10 minutos, los cuales son independientes de la temperatura.

Para poder calificar la tendencia que tiene la medida de la resistencia con respecto al tiempo:

- Un aislamiento en buen estado muestra un aumento continuo de la resistencia en función del tiempo. Porque la medición está altamente influenciada por la corriente de carga capacitiva y de absorción dieléctrica y débilmente por la corriente de fuga o de conducción, estas últimas son las corrientes parásitas y disminuyen.
- En un aislamiento contaminado la corriente de fuga es mucho más grande, constante y sobrepasa las corrientes de carga capacitiva y absorción dieléctrica, por lo que la medición de la resistencia de aislamiento alcanzará un nivel constante y estable.



La resistencia de aislamiento depende fuertemente de la temperatura por lo que se debe corregir a una temperatura estándar igual a 40°C mediante un factor de corrección  $K_T$  que depende del sistema de aislamiento.[7]

#### 4.3.3. Prueba de índice de polarización (IP).

Se trata de una prueba que consiste en realizar dos mediciones de la resistencia de aislamiento una vez transcurridos 1 y 10 minutos tras la aplicación del voltaje de prueba y que comprueban la calidad del aislamiento.

El índice de polarización, (IP), (10), es la ratio que relaciona la resistencia medida transcurridos 10 minutos con la resistencia medida transcurridos 1 minuto.

$$IP = \frac{R_{\text{aislamiento } 10 \text{ min}}}{R_{\text{aislamiento } 1 \text{ min}}} \quad (10)$$

Una relación baja implica poco cambio de la resistencia, y por lo tanto, un aislamiento en mal estado, mientras que una relación alta indica lo opuesto.

Para poder caracterizar el aislamiento de forma cuantitativa mediante la prueba del Índice de polaridad se ha de tener en cuenta la Tabla 3.

Tabla 3.- Valores de la prueba de índice de polaridad para caracterizar el envejecimiento del aislamiento.[11]

Índice de polarización	Estado del aislamiento
IP<1	Malo
1<IP<2	Cuestionable
2<IP<4	Adecuado
>4	Bueno

Por otra parte, las siguientes consideraciones son necesarias para garantizar un estudio correcto.

- Algunos valores de IP por encima de cinco podrían indicar un aislamiento quebradizo o agitado.
- No se puede calcular el IP con un equipo de pruebas de rango limitado, porque se necesitan los dos valores cuantitativos para calcular la ratio, pueden llegar las resistencias hasta los teraohmios.

- No se recomienda esta prueba para aislantes que no sean sólidos ya que dará valores cercanos a la unidad aun teniendo buen aislamiento, esto es debido a que son materiales con baja absorción dieléctrica.

Además, las normas muestran unos valores mínimos de índice de polarización según la clase de aislamiento. Estos valores se pueden observar en la Tabla 4.

*Tabla 4.- Valores de la prueba de índice de polaridad para caracterizar el envejecimiento del aislamiento según la clase de aislamiento.[12]*

Aislamiento	Valor del índice
Clase A	1'5
Clase B	2
Clase F	2
Clase H	2

#### **4.3.4. Prueba de escalón de tensión (SV).**

Se trata de una prueba de medida puntual pero la tensión aplicada es un escalón. Puesto que el aislamiento es resistivo, un incremento en la tensión de prueba lleva a un incremento en la corriente, de modo que la resistencia permanece constante.

Se ha establecido un procedimiento estándar que consiste en incrementar el voltaje hasta cinco veces, en variaciones de tensión iguales, y se debe esperar entre ellos un minuto antes de medir la resistencia del aislamiento final, sino pueden llegar a darse medidas erróneas.

Para poder caracterizar el envejecimiento del aislamiento en la prueba de escalón de tensión se han de seguir las siguientes consideraciones:

- Si no hay diferencia apreciable entre el valor anterior y posterior de la medida: el aislamiento está en buen estado.
- Si hay diferencia apreciable en los valores: el aislamiento requiere un reacondicionamiento más minucioso.
- Si el aislamiento falla a 2500V: se debe dudar del estado del motor; lo más probable es que falle cuando se ponga en servicio.

Como en la prueba de IP, la prueba de escalón de voltaje es una prueba que está libre del efecto de la temperatura.

#### **4.3.5. Prueba de rampa de tensión.**

En esta prueba la tensión de prueba se incrementa gradualmente en forma de rampa a una velocidad de 1kV por minuto hasta llegar a un nivel final, lo que redunda en un incremento de la corriente. Por lo que cualquier variación de la corriente, en comparación con el incremento en el voltaje de prueba puede proporcionar información de diagnóstico útil sobre el estado de aislamiento.

La prueba de rampa permite controlar mejor la tensión de prueba aplicado en comparación con la prueba de escalón de voltaje, advirtiendo antes sobre una inminente ruptura de aislamiento y por lo tanto, permite evitar daños en el aislamiento.

Para poder caracterizar el envejecimiento del aislamiento en la prueba de rampa de voltaje han de seguirse las siguientes consideraciones:

- Los devanados en buen estado producen una curva de corriente suave, de crecimiento casi lineal en función de la tensión aplicada.
- Se debe considerar cualquier desvío de una curva suave como una advertencia de que la prueba del aislamiento puede estar acercándose a una posible ruptura (5% por debajo del voltaje de ruptura).
- Un brusco aumento en la corriente generalmente indica que la ruptura es inminente.
- No es común una brusca caída en la corriente, pero si ocurre cuando el voltaje de prueba supera al máximo voltaje operativo del devanado, también puede indicar una ruptura inminente.
- Una disminución del 25% o más de la resistencia de aislamiento entre dos escalones consecutivos es una señal de deterioro del aislamiento habitualmente relacionado con la presencia de contaminantes.
- Si existen grietas en el aislamiento de tierra también se observará una brusca respuesta de corriente casi vertical, a menudo precedida por pequeños picos, antes de que finalmente ocurra la ruptura.
- Con esta prueba se pueden diagnosticar distintos defectos y deterioros del aislamiento como grietas o fisuras, contaminación superficial, resina no curada, absorción de humedad, y huecos.

Los resultados de este método son totalmente independientes del tipo de aislantes y de la temperatura, puesto que no se basa en el valor intrínseco de los aislamientos medidos sino en la disminución efectiva del valor leído al cabo de un tiempo idéntico para dos tensiones de ensayo diferentes.

#### 4.3.6. Prueba de la absorción dieléctrica (DAR).

Esta prueba es similar a la prueba del índice de polarización, pero se realiza para equipos en los que el aislamiento se polariza muy rápido, y por tanto la corriente de absorción disminuye rápidamente. Un ejemplo serían los aislamientos con baja absorción dieléctrica como los aislantes no sólidos.

Consiste en realizar la lectura de las resistencias de aislamiento transcurridos 30'' y 60'' desde la alimentación de la tensión de prueba.

El índice DAR, (11), consiste en la relación entre la resistencia de aislamiento medida tras 1 minuto y la resistencia de aislamiento medida tras 30 segundos.

$$DAR = \frac{R_{\text{aislamiento 1 min}}}{R_{\text{aislamiento 30 segundos}}} \quad (11)$$

El índice se compara con los siguientes valores para obtener una aproximación de en qué estado se encuentra el aislamiento.

Tabla 5.- Valores de la prueba de absorción dieléctrica para caracterizar el envejecimiento del aislamiento.[11]

Valor del DAR	Condición de aislamiento
DAR<1.25	Insuficiente
1.25<DAR<1.6	OK
>1.6	Excelente

Tanto la prueba DAR como la prueba IP suelen revelar la presencia de contaminantes o de humedad en la superficie de los aislantes. Si se aplica una tensión débil, el valor de IP o DAR se puede escapar de lo habitual. Mientras que, si se aplica una tensión significativa, se puede producir la ruptura del aislamiento.

#### 4.3.7. Prueba de descarga dieléctrica (DD).

En la prueba de descarga dieléctrica o prueba de corriente de reabsorción se mide la intensidad residual durante la descarga una vez transcurrido 1 minuto, una vez desaparecida la corriente de fuga o capacitiva.

Esto es debido a que mientras se alimenta mediante la fuente de alimentación de tensión continua al aislamiento, éste se ha cargado con una capacidad C. Para comenzar la prueba, una

vez cargado, se conecta un resistor de descarga entre bornes del aislamiento sustituyendo la fuente de tensión para descargar el equipo como se muestra en la Figura 18.

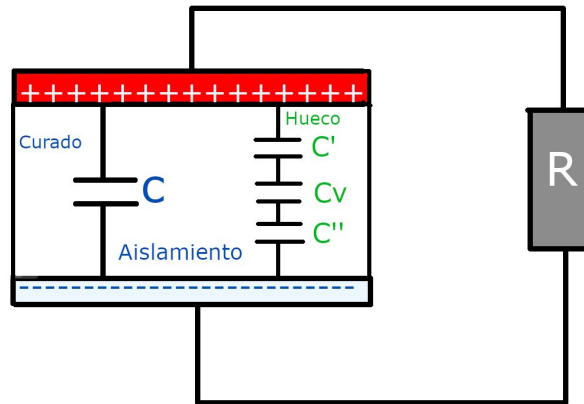


Figura 18.- Esquema de funcionamiento para descargar el dieléctrico.

El procedimiento estándar consiste en alimentar el aislamiento a la tensión de prueba de 10' a 30' hasta que se "cargue" o haya tenido lugar la absorción total. Una vez transcurrido este tiempo, se elimina la tensión de prueba y el aislamiento se descarga a través de los resistores de descarga internos del instrumento para disipar rápidamente la carga capacitiva.

Tras 1' de descarga con la resistencia interna del megaóhmetro, se mide el flujo de la corriente remanente con el mismo dispositivo. En este punto la capacitancia se ha descargado y el voltaje ha colapsado de modo que la carga almacenada en los dipolos puede verse independientemente de las corrientes de "enmascaramiento" que dominan durante la fase de descarga de una prueba de aislamiento.

El índice de descarga dieléctrica, (DD), para cuantificar el estado del aislamiento se calcula mediante (12):

$$DD = \frac{I_{tras\ 1\ min(nA)}}{Voltaje_{prueba(V)} \cdot Capacitancia_{(\mu F)}} \quad (12)$$

Para calcular la capacitancia del aislamiento se utiliza (13).

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (13)$$

dónde C es la capacitancia,  $\varepsilon$  es la permitividad dieléctrica del material, A es la sección y d es el espesor del material.

La medición depende de la temperatura de modo que es importante realizar la prueba a una temperatura de referencia o registrar la temperatura para cada medida.

Tras obtener el valor de DD, (11), se puede caracterizar el aislamiento mediante la Tabla 6.

Tabla 6.- Valores de la prueba de descarga dieléctrica para caracterizar el envejecimiento del aislamiento.[11]

Índice DD	Calidad
$DD > 7$	Mala
$4 < DD < 7$	Mediocre
$2 < DD < 4$	A vigilar
$DD < 2$	Buena

Un aislamiento homogéneo presentará un valor DD igual a cero, mientras que un aislamiento multicapas correcto presentará un valor de DD de hasta 2.

#### 4.4. Caracterización del envejecimiento del aislamiento eléctrico con el dispositivo LCR.

Al conectar el LCR entre una parte activa y una puesta a tierra, como puede ser un aislamiento, se obtienen en función de la frecuencia elegida un equivalente en serie formado por bobina y resistencia, otro equivalente en paralelo formado por condensador y bobina y la impedancia total equivalente con su desfase. Estos circuitos equivalentes se muestran en la Figura 19.

Se ha considerado como hipótesis que el aislamiento se comporta de forma similar al condensador. Por lo que se va aplicar este método a un condensador, B32654A0224K00 -TDK, para caracterizar el comportamiento del aislamiento con respecto a la frecuencia.

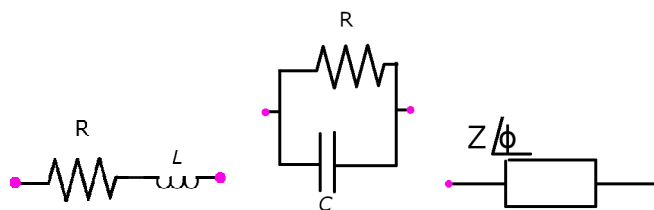


Figura 19.- Circuitos equivalentes que se obtienen del LCR 6300.

Tanto el condensador como el aislamiento tienen el mismo “esquema eléctrico interno” que se muestra en la Figura 20.

Dos condiciones iniciales que ayudan a calcular los parámetros característicos son:

- $R_{ESR}$ : Es el equivalente en valor a la resistencia serie que se encuentra en el circuito equivalente R-L y depende de la frecuencia.
- C: Es equivalente en valor a la capacidad del condensador en baja frecuencia que se obtiene del circuito equivalente R-C.

De esta forma quedan por calcular dos grados de libertad  $R_p$  y  $L$ . Para calcular  $L$ , se supone un valor inicial para  $L$  y se itera  $L$  mediante el método de análisis frecuencial hasta que se igualen los valores de (14).

$$\overline{Z_{medida}} = \overline{Z_{calculada}} \quad (14)$$

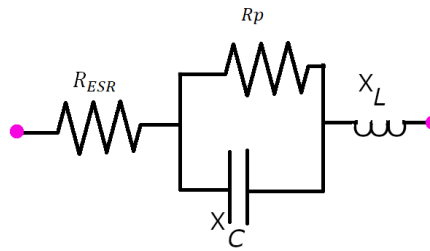


Figura 20.- Circuito equivalente de análisis frecuencial del aislamiento.

Del análisis frecuencial se conocen (15), (16) y (17):

$$X_C = -\frac{j}{\omega \cdot C} \quad (15)$$

$$X_L = j \cdot \omega \cdot L \quad (16)$$

$$Z_{medida} = \alpha + \beta \cdot j \quad (17)$$

Por lo que el valor de  $Z$  calculada es equivalente a (18).

$$\begin{aligned} Z_{calculada} &= R_{ESR} + j \cdot \omega \cdot L + \frac{-R_p \cdot \frac{j}{\omega \cdot C}}{R_p - \frac{j}{\omega \cdot C}} \\ &= R_{ESR} + j \cdot \omega \cdot L + \frac{-R_p \cdot j}{R_p \cdot \omega \cdot C - j} \\ &= R_{ESR} + j \cdot \omega \cdot L + \frac{-R_p^2 \cdot C \cdot \omega \cdot j + R_p}{R_p^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2 + 1} \end{aligned} \quad (18)$$

De (18) se obtiene el valor de la resistencia en paralelo.

$$A = R_{ESR} + \frac{R_p}{R_p^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2 + 1} \quad (19)$$

$$B = \omega \cdot L - \frac{R_p^2 \cdot C \cdot \omega}{R_p^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2 + 1} \quad (20)$$

Iterando L hasta igualar A con  $\alpha$  y B con  $\beta$  se consiguen obtener todos los parámetros del circuito equivalente del aislamiento.

A continuación, se muestra en la Figura 21, Figura 22 y Figura 23 cómo varían el parámetro  $R_p$ , el parámetro  $C_p$  y el parámetro *tangente delta* con la frecuencia, respectivamente

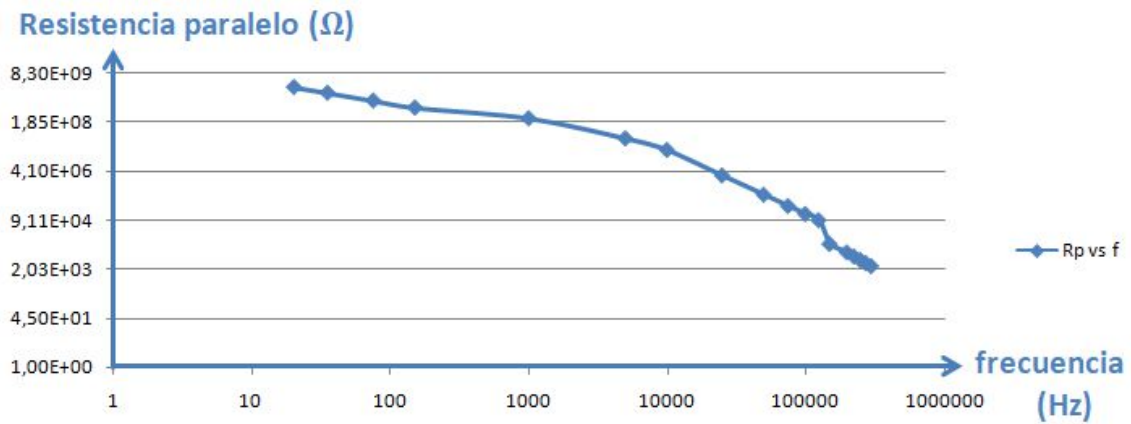


Figura 21.- Valores del parámetro de resistencia en paralelo frente a la frecuencia.

En la Figura 21 se puede observar como al aumentar la frecuencia disminuye el valor de la resistencia en paralelo por lo que se observa que aumenta la corriente de fuga al aumentar la frecuencia.

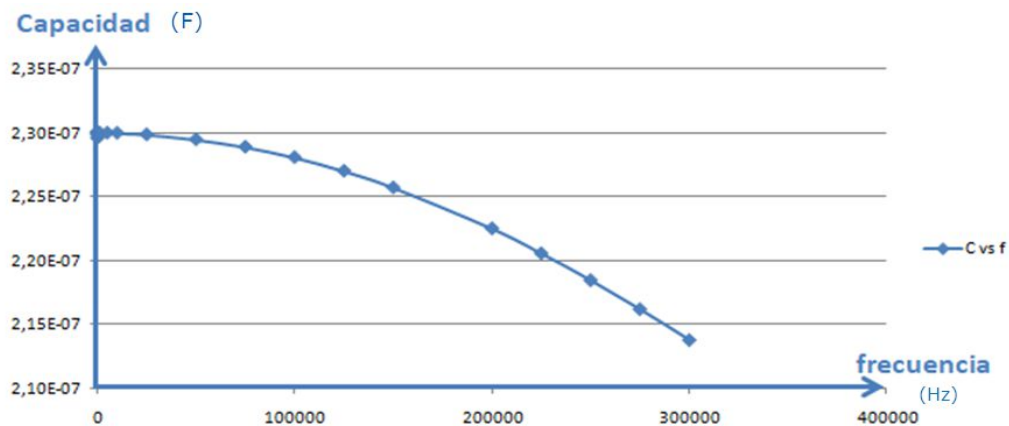


Figura 22.- Valores en escala logarítmica del parámetro de la capacidad frente a la frecuencia.



En la Figura 22 se muestra cómo el parámetro  $C$  disminuye con respecto a la frecuencia. Esto significa que existen unas pérdidas de capacidad de hasta 6.95% en el condensador cuando aumenta la frecuencia.

Además, según (5), se puede calcular la tangente delta. En la Figura 23 se observa que hay una variación de hasta el 0.5 %.

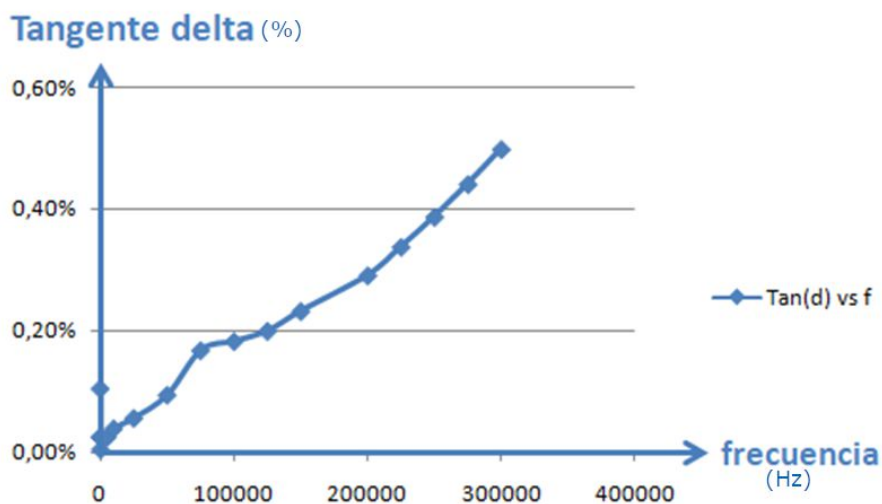


Figura 23.- Dependencia de la tangente  $\delta$  de la frecuencia.

El LCR 6300 solo llega a 300 kHz, lo cual no es suficiente para caracterizar el condensador en todo el rango de frecuencia como se muestra en la Figura 24. En esa figura se observa que sólo está caracterizada la primera parte de la Figura 3 por lo que se necesitaría un aparato con mayor rango de frecuencia para caracterizar la dependencia frecuencial completa.

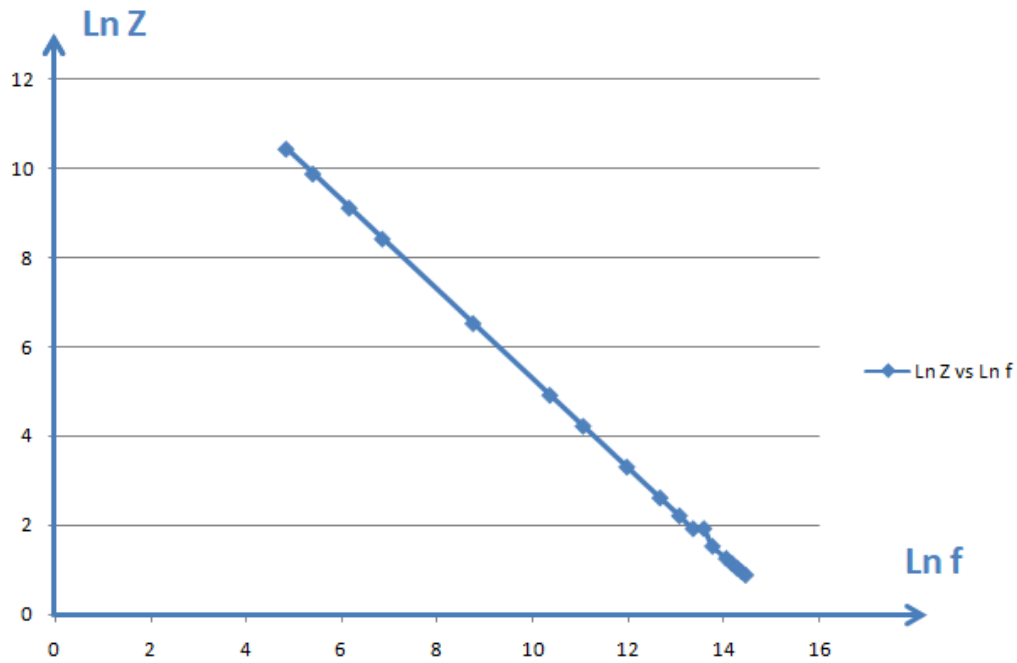
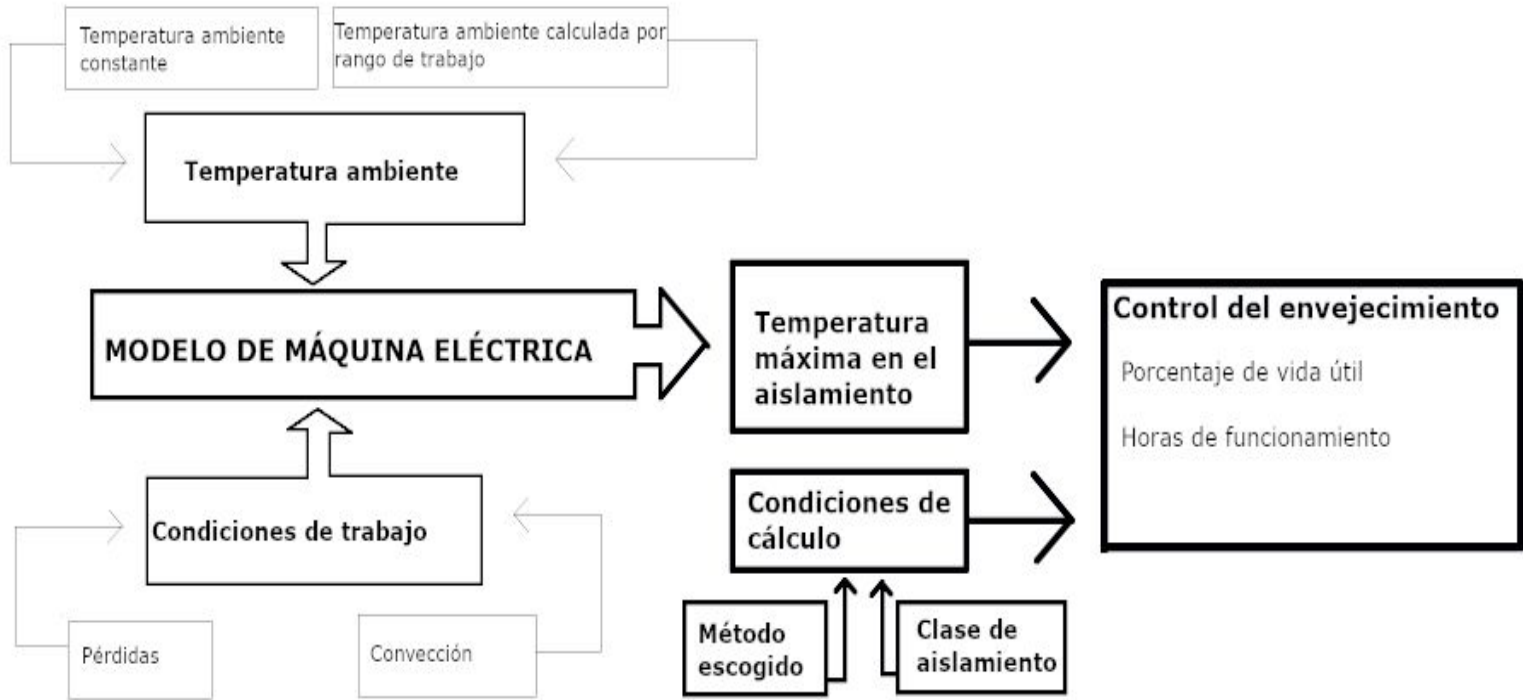


Figura 24.- Comportamiento de la impedancia del condensador con respecto a la frecuencia.

La vida útil experimental de los condensadores se puede obtener de la referencia[13], la cual remite a un “*Handbook*” que reúne pruebas experimentales con distintos elementos y dónde se obtiene una ecuación para calcular la vida útil.

#### 4. Técnicas teóricas para modelar el envejecimiento de un dieléctrico.

En la Figura 25 se muestra el procedimiento para obtener una forma de control del



envejecimiento del aislamiento por la temperatura.

Figura 25.-Procedimiento de cálculos.

##### 4.1.Métodos de cálculo de vida útil.

Los métodos de cálculo de vida útil, usados en la caracterización del aislante, y presentados en la referencia [14] de la bibliografía son:

###### Método 1.

Según el método 1, la esperanza de vida estimada  $L_{est}$  se calcula teniendo en cuenta únicamente la temperatura  $T_{trab}$  a la que está sometido el aislante y viene dada por:

$$L_{est} = L_0 \cdot 2^{\left(\frac{T_0 - T_{trab}}{10}\right)} \quad (21)$$

Dónde  $L_0$  indica la esperanza de vida útil especificada por la clase de aislamiento, y  $T_0$  la temperatura máxima de trabajo especificada por la clase de aislamiento.

## Método 2.

Este caso es una ampliación del anterior dónde se incluye la influencia de la sobretensión o subtensión producida en el aislante.

$$L_{est} = L_0 \cdot 2^{\left(\frac{T_0 - T_{trab}}{10}\right)} \cdot \frac{V_0}{V_{trab}} \quad (22)$$

Los nuevos parámetros  $V_0$  y  $V_{trab}$  indican, respectivamente, la tensión máxima de trabajo especificada por el fabricante, la tensión a la que realmente se opera.

## Método 3.

Este método sigue la ecuación de Arrhenius, según la cual el envejecimiento del aislamiento depende de forma exponencial de la temperatura.

$$L_i = B_{est} \cdot e^{\left(\frac{E_A}{T_i \cdot k}\right)} \quad (23)$$

$$E_A = \frac{k \cdot \ln\left(\frac{L_1}{L_2}\right)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (24)$$

$$B_{est} = \frac{L_1}{e^{\frac{E_A}{k \cdot T_1}}} \quad (25)$$

dónde  $B_{est}$  es el parámetro específico del material,  $E_A$  la energía de activación y  $k$  la constante de Boltzman.

Para poder aplicar este método son necesarias dos pruebas experimentales, con las que determinar los parámetros  $E_A$  y  $B_{est}$ .

## Método 4.

Este método, basado en (26), (27) y (28), es igual que el anterior pero depende también de la tensión a la que se encuentra sometido el aislamiento.

$$L_i = B_{est} \cdot \frac{V_0}{V_{trab}} \cdot e^{\left(\frac{E_A}{T_i \cdot k}\right)} \quad (26)$$

$$E_A = \frac{k \cdot \ln\left(\frac{L_1}{L_2}\right)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (27)$$

$$B_{est} = \frac{L_1}{\frac{E_A}{e^{k \cdot T_1}}} \quad (28)$$

## 4.2. Influencia de la temperatura ambiente.

Cómo es conocido, la temperatura ambiente varía a lo largo del año dependiendo de la hora del día del mes en el que se encuentre trabajando la máquina. Por lo que se procede a calcular una temperatura ambiente constante que sea equivalente al ciclo de trabajo de la máquina eléctrica escogido por el usuario.

Para el cálculo se utilizan las bases de datos de Aemet, de dónde se obtiene la temperatura máxima, media y mínima de cada mes, se utilizará el Método 1. para calcular el desgaste del aislamiento que ocasiona la temperatura y finalmente, se calculará la temperatura media constante para tenerla en cuenta como dato en base a futuros cálculos.

Inicialmente se muestra como calcular la temperatura ambiente equivalente para un ciclo de trabajo en el que la máquina esté trabajando continuamente durante todas las horas de los días.

Para realizar una estimación de las condiciones de trabajo, los datos de temperatura se han obtenido con media horaria en la página de AemetOpenData. [15]

El programa “Ejecutar\_1”, Anexo B, abre los documentos correspondientes a los datos de cada mes y, crea un fichero llamado “Resumen.txt” en el que se recogen la temperatura máxima, mínima y media de cada día.

Dicho documento se abre con Excel para la adaptación de formato al de la hoja de cálculo, se separan los datos por columnas (eliminando las comas) y se guardan con el mismo nombre, sobrescribiéndolo. Este paso está referenciado en la Figura 26. Finalmente, se sustituyen “,” por “.”.

1	Temperatura media	Temperatura minima	Temperatura maxima
2	1"2,0", "0,9", "3,1",		
3	2"1,0", "-0,3", "2,3",		
4	3"4,0", "-1,1", "9,1",		
5	4"6,5", "-1,9", "14,9",		

Figura 26.- Temperaturas del documento de texto abierto en Excel.

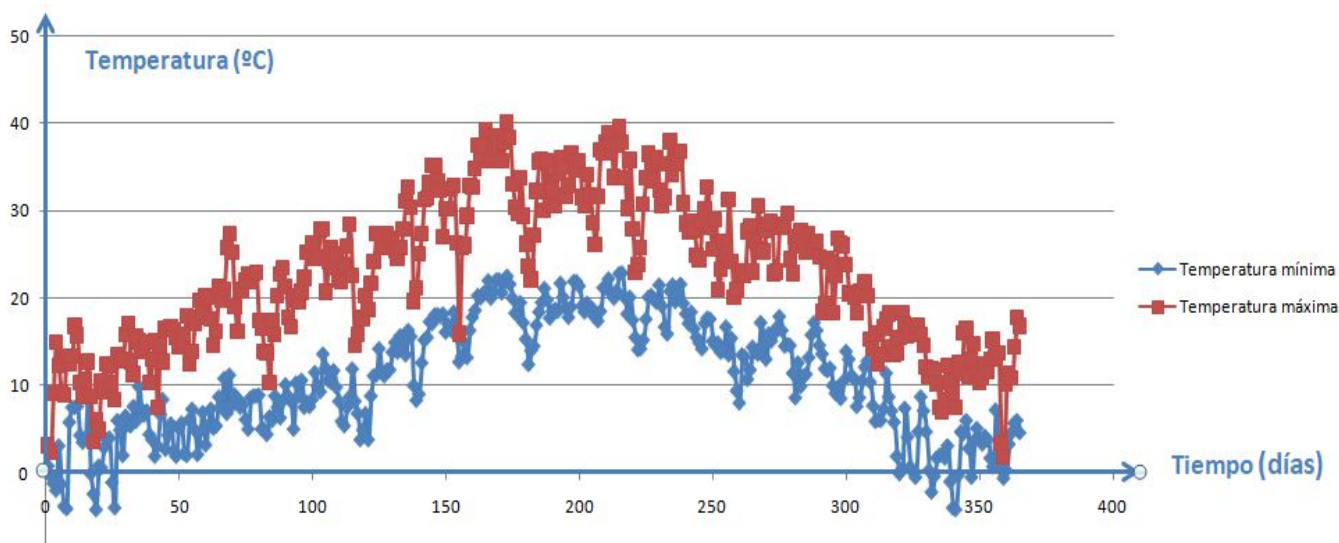


Figura 27.- Temperaturas máximas y mínimas durante los días del año.

A continuación, se ejecuta el programa “Ejecutar\_2”, el cual lee del fichero “Resumen.txt” la temperatura máxima y mínima y crea una serie de temperaturas entre las 15h del día anterior y las 15h del mismo día, suponiendo que a las 7h se da la temperatura más baja y a las 15h la temperatura más alta. Esto es necesario por si el usuario decide no tener en cuenta todas las horas del año y quiere conocer la temperatura media equivalente dentro de un rango de horas (p.e. el rango de horas en el que trabaja la máquina es de 8h a 17h).

Por lo que finalmente, se crea en el fichero “Resumen\_1.txt” una lista de temperaturas recogidas cada media hora durante todo el año y representada en la Figura 27.

Asimismo, se genera el documento “Final.txt”, que recoge la distribución de frecuencias de temperatura (Figura 28), calculando, el número de temperaturas medidas en rangos de media hora y a lo largo del año.

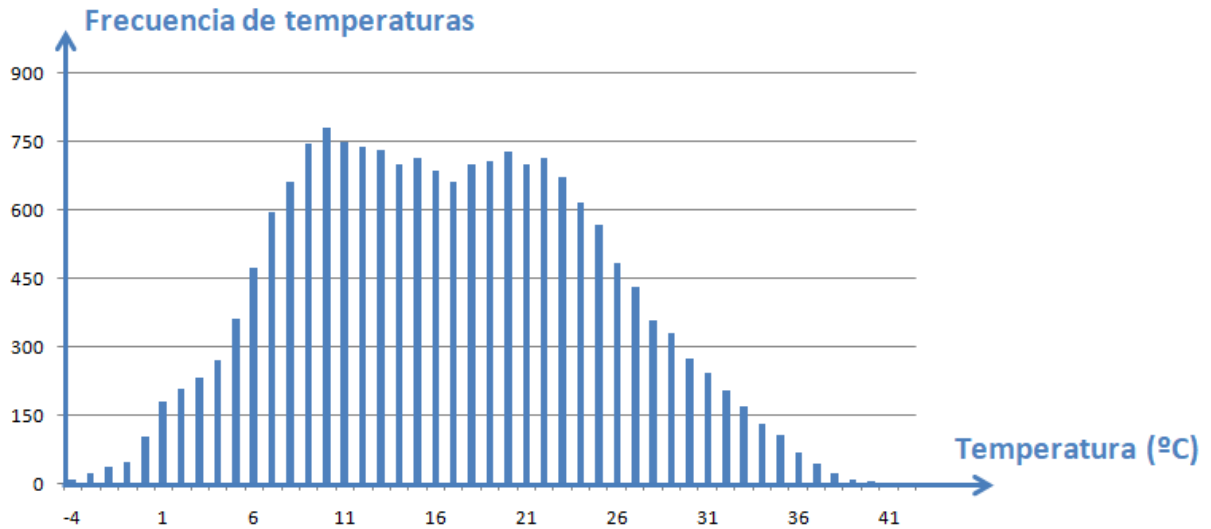


Figura 28.-Frecuencias de temperatura evaluadas en rangos de media hora durante el año.

En base a estos resultados se calcula la temperatura equivalente a lo largo de todo el año en función de la esperanza de vida mediante el siguiente procedimiento.

Para el cálculo de la temperatura ambiente se ha considerado que la máquina está trabajando las 24 horas del día.

Primero se calcula el envejecimiento,  $L_T$ , que ocasiona la temperatura ambiente de cada rango al aislamiento mediante el Método 1.

Mediante (29), se obtiene el porcentaje de vida perdido por las horas de cada rango de temperaturas,  $L'_T$ .

$$L'_T = \frac{100 \cdot N_{hr}}{L_T} \quad (29)$$

dónde  $N_{hr}$  es el número de medidas de temperatura ambiente que se ha dado en ese rango en todo el año.

La suma del porcentaje de vida perdido producido por cada rango de temperaturas es equivalente al porcentaje de vida perdido general producido por la temperatura ambiente durante todo el año sobre el aislamiento y al dividir ese valor entre el número de medidas de temperatura ambiente totales en todo el año, se obtiene el porcentaje de envejecimiento equivalente por hora.

Para obtener la vida útil equivalente total en todo el año bajo la influencia de la temperatura ambiente se debe invertir el valor anterior para obtener horas en vez de porcentaje. tal y como se muestra en la siguiente fórmula.

$$L''_T = \frac{100}{\frac{\sum L'_T}{N_{ht}}} \quad (30)$$

Finalmente, conocida la vida útil del aislamiento en función del envejecimiento producido por la temperatura ambiente durante todo el año se obtiene la temperatura equivalente que produce dicho envejecimiento mediante el Método 1..

El valor obtenido, mediante (31), de la temperatura ambiente equivalente es de 19.03°C.

$$T''_{amb} = \frac{T_0 - 10 \cdot \log\left(\frac{L''_T}{L_0}\right)}{\log(2)} \quad (31)$$

Además, en el programa “Ejecutar\_2” se ha añadido una sección al principio, a partir de la variable “PorHorario”, en la cual, si el valor de la variable es “Si” y se fijan las condiciones de hora de trabajo de la máquina eléctrica, “Hora\_max” y “Hora\_min”, el programa elige sólo las temperaturas ambientales en ese rango para el cálculo de la temperatura ambiente equivalente y de la vida útil del aislamiento. En el anexo E se muestra un ejemplo realizado con una franja de trabajo de 8h a 14h.

#### **4.3. Modelado del envejecimiento térmico del aislamiento de la máquina eléctrica.**

Para localizar en la máquina eléctrica el punto (hot spot) de máxima temperatura y el valor de la misma, en el proyecto se han desarrollado otros dos programas, en lenguaje de programación LUA, [14], y [15], que permite que sean ejecutados con el programa de elementos finitos FEMM. Ambos programas se encuentran en el anexo A y B.

Para poder obtener con mayor precisión el punto de máxima temperatura y su valor se han realizado mejoras que se explican a continuación.

Las variantes en el programa del anexo A en el que se estudia la distribución de temperaturas en el devanado de la máquina eléctrica con una distribución de conductores tanto alineada como cruzada son:



- Refrigeración por convección: Existen dos zonas distintas definidas de convección, la frontal y la lateral para darles distinto valor y tener diferentes refrigeraciones.
- Cambio de las pérdidas según la variación de temperatura en el conductor: La resistencia térmica de un conductor activo varía según la temperatura a la que se encuentre [18]. Por lo que, si la resistencia varía con la variación de temperatura y sabiendo que la potencia disipada es igual a la resistencia por la intensidad al cuadrado, se aproxima, al ser la intensidad constante, a que la potencia varía de la misma forma que la resistencia. Eso se realiza mediante las siguientes fórmulas.

$$T_{PROMEDIO} = \frac{\sum Temperatura_{MEDIDA}}{N_{CONDUCTORES}} \quad (32)$$

$$\alpha_{correccion} = 1 + (T_{PROMEDIO} - T_{AMBIENTE}) \cdot \alpha_{TERMICO} \quad (33)$$

$$Perdidas_{reales} = Perdidas_{inicio} \cdot \alpha_{correccion} \quad (34)$$

- Distribución de las pérdidas en los cables: Diferencia las pérdidas en el primario y en el secundario ya sea o por diferente geometría en los conductores (más largos y por lo tanto mayor resistencia) o por que circula distinta corriente por ellos mediante un coeficiente.
- Estudio de la variación de la temperatura según se van modificando varios parámetros en bucle para obtener más información al tener más casos.

Mientras que las variantes en el programa del anexo B el cual trata sobre el estudio de la distribución de temperaturas de la máquina eléctrica total son:

- Refrigeración por convección: Añadiendo un “plus” al anterior. En este caso se modifica y el aire que se utiliza para refrigerar, se va calentando conforme avanza en la dirección de la carcasa del devanado.

Se divide en fragmentos la capa exterior y se le da diferente convección añadiéndole cómo término diferencial la temperatura, la cual sigue la fórmula 33.

$$\Delta T = \frac{P}{c \cdot Q_m} \quad (35)$$

$$Q_m = v \cdot A \cdot \rho \quad (36)$$

dónde “c” es el calor específico, “P” la potencia disipada calculada en (37), “Q<sub>m</sub>” el

caudal másico, “ $v$ ” la velocidad del flujo, “ $A$ ” el área que atraviesa el flujo y “ $\rho$ ” la densidad de dicho flujo.

La potencia disipada, “ $P$ ”, puede ser un dato insertado por el usuario o se puede calcular mediante(37).

$$P = \frac{\Delta T_{\text{exterior}} \cdot \lambda}{x} \quad (37)$$

dónde “ $\lambda$ ” es la conductividad térmica, “ $x$ ” es el ancho de la capa exterior y “ $\Delta T$ ” es la variación de temperatura que hay entre el exterior y la carcasa.

- Potencia disipada como dato o cómo cálculo según las pérdidas producidas por el conductor.
- Varios aislamientos: Entre espiras y en la parte superior e inferior de las espiras.
- Creación del archivo con simulaciones de vida en función de la temperatura. En este apartado serían necesarios los datos de la vida útil inicial y de la temperatura máxima de trabajo.
- Estudio de la variación de la temperatura según se van modificando varios parámetros en bucle.

#### **4.3.1. Modelo de devanado de la máquina eléctrica con disposición de conductores alineada.**

El código del programa se puede encontrar en el Anexo A en el cual se debe especificar que el valor de la variable disposición\_conductores sea 1.

Las variables definidas en el programa se pueden apreciar en la Figura 29.

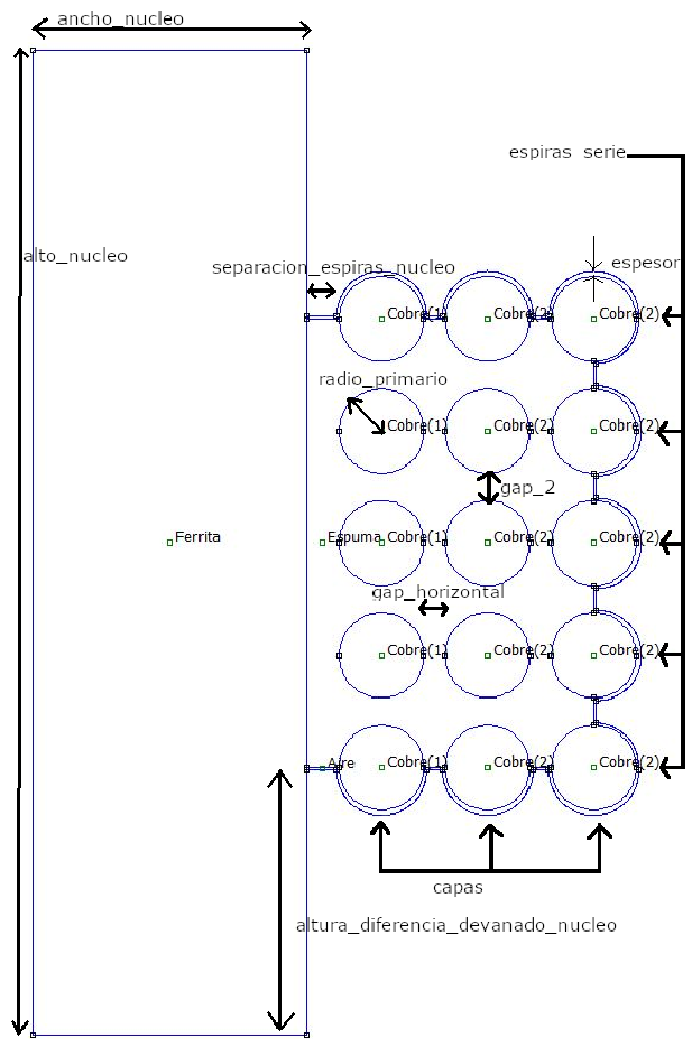


Figura 29.- Máquina eléctrica con disposición de conductores alineados y representación de las variables del programa.

Tras definir las variables, Figura 29, se crea un ejemplo para ejecutar el programa con las condiciones de la Tabla 7.

Tabla 7.- Datos del ejemplo con los conductores alineados.

Propiedad	Valor
Aislante	Resina epoxi
Conductor	Cobre
Perdidas	2 W
Radio conductor	1.55 mm
Separación	Mínima
Diferencia temperatura [Opcion]	3

El resultado se encuentra en la Figura 30, en la cual se puede observar que está la distribución de temperaturas de la máquina eléctrica con su respectiva leyenda de colores y temperaturas a la derecha y en medio de la figura se observa el resultado.

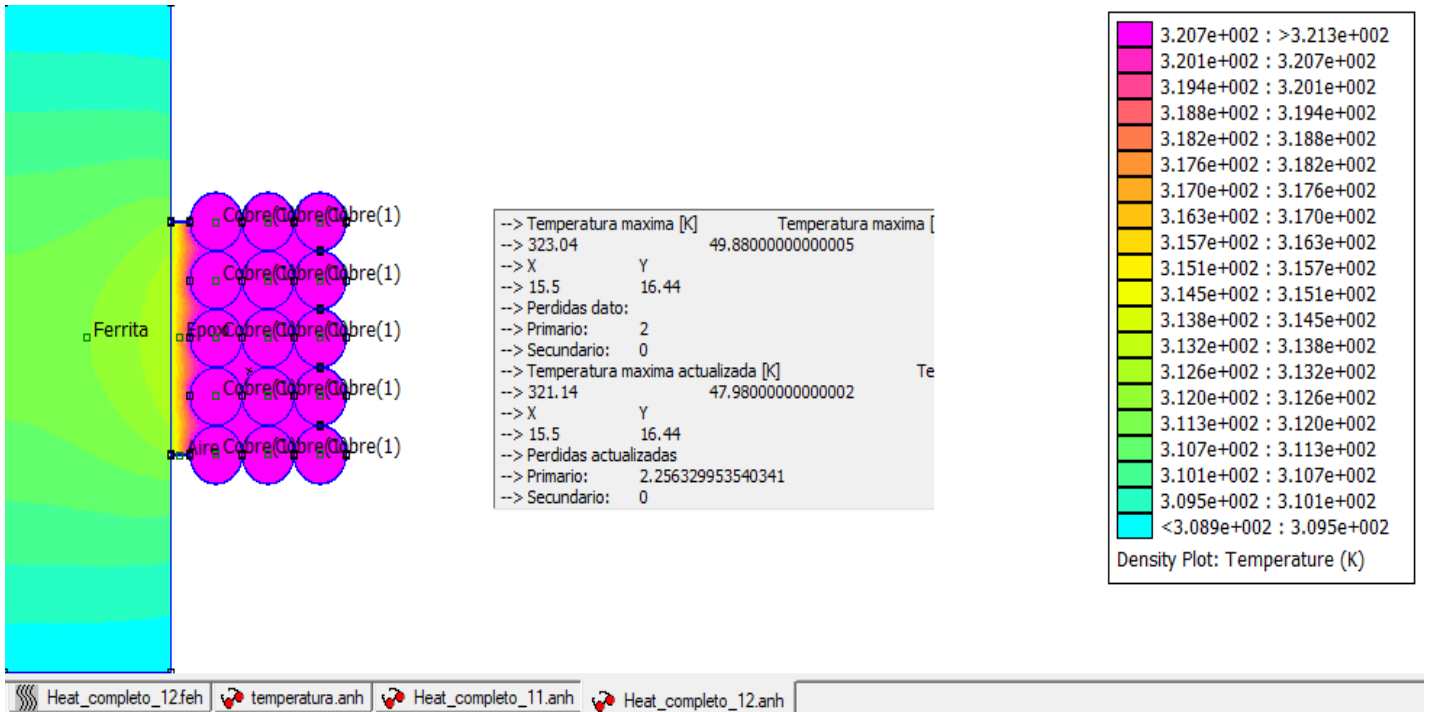


Figura 30.- Resultado de ejecutar el programa del anexo A con disposición de conductores = 1 y características previamente definidas en la Tabla 7.

En esta ejecución del programa se han activado la opción de “Búsqueda” y la opción de “Opción”. Por ello en el resultado inicialmente se obtiene la temperatura máxima, en Kelvin y en grados Celsius, y las coordenadas de dónde se da dicha temperatura, marcada con una negra “x” la Figura 30. Debido a la segunda opción se obtiene una actualización del valor de pérdidas debido a la acción de la temperatura, en este caso han cambiado 0.25 W y la temperatura máxima en el punto máximo ha disminuido. Este cambio es calculado mediante (32), (33) y (34) en 4.3.

Además, también se crea en el fichero “Resultado\_Devanado.txt” dónde se encuentra el número del conductor, las pérdidas, la convección frontal y la temperatura en grados y por último la actualización de las pérdidas.

Una vez se ha obtenido la temperatura máxima se tiene que elegir la clase de aislante, Tabla 1, el método de cálculo de envejecimiento del aislamiento según la temperatura, 4.1 y dirigirse a 4.4.

4.3.2. Modelo de devanado de la máquina eléctrica con disposición de conductores en cruz.

El código del programa de la siguiente imagen se puede encontrar en el Anexo B en el cual se debe especificar que el valor de la variable “disposición\_conductores” sea 2.

Las variables definidas en el programa se pueden apreciar en la Figura 31.

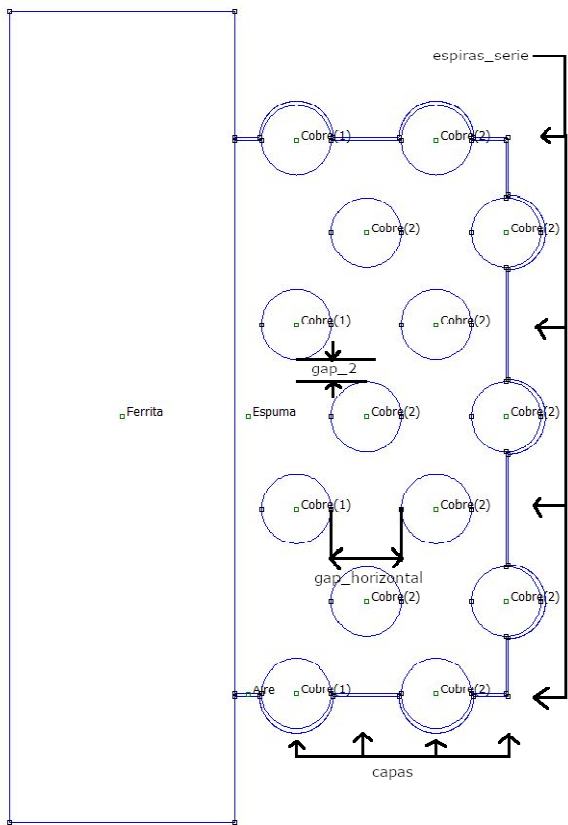


Figura 31.- Máquina eléctrica con disposición de conductores cruzados y representación de variables del programa.

Tras definir las variables de la Figura 31, se crea un ejemplo para ejecutar el programa con las condiciones de la Tabla 8. Se obtiene la Figura 32 con la del resultado igual que en el anterior apartado.

Tabla 8.- Datos del ejemplo con los conductores en cruz.

Propiedad	Valor
Aislante	Resina
Conductor	Cobre
Perdidas	2 W
Radio conductor	1.55 mm

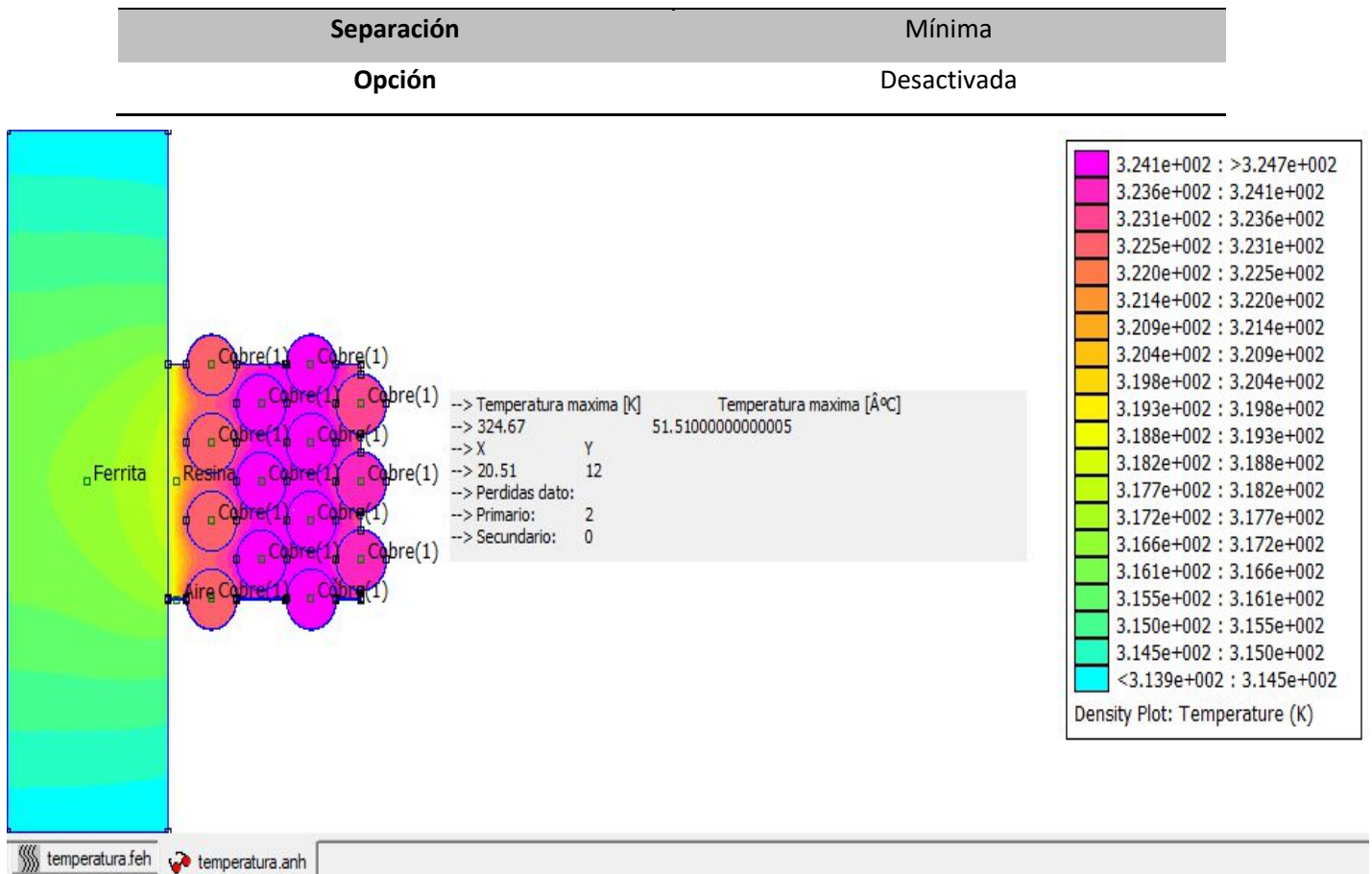


Figura 32.- Resultado de ejecutar el programa del anexo A con disposición de conductores = 2 y características previamente definidas en la Tabla 8.

En esta ejecución del programa se ha activado solo la opción de “Búsqueda”. Por ello en el resultado únicamente se obtiene la temperatura máxima, en Kelvin y en grados Celsius, y las coordenadas de dónde se da dicha temperatura, marcada con una negra “x” la Figura 32.

Una vez se ha obtenido la temperatura máxima se tiene que elegir la clase de aislante, Tabla 1, el método de cálculo de envejecimiento del aislamiento según la temperatura, 4.1 y dirigirse a 4.4.

#### 4.3.3. Modelo de la máquina eléctrica con imanes permanentes.

En la Figura 33 se presenta una máquina eléctrica entera con el estator devanado y el rotor de imanes permanentes hechos de ferrita.

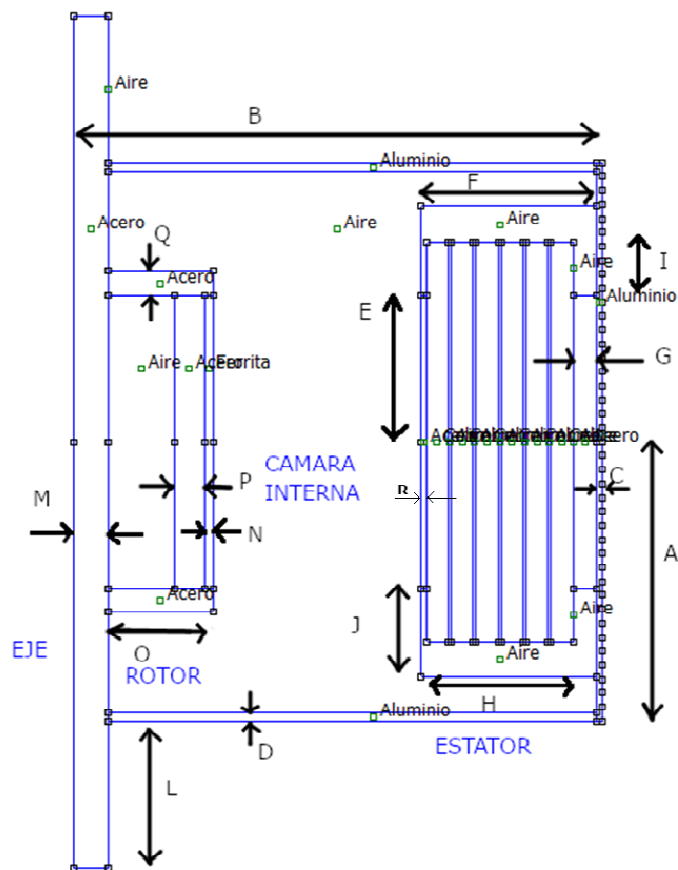


Figura 33.- Máquina eléctrica y representación de variables del programa.

Tras definir las variables de la Figura 33, se crea un ejemplo para ejecutar el programa con las condiciones de la Tabla 9. Se obtiene la Figura 34 con el resultado de igual distribución que en el anterior apartado. Se obtiene la con la estructura del resultado igual que en el anterior apartado.

Tabla 9.- Datos del ejemplo.

Propiedad	Valor
Aislante	Espuma
Conductor	Cobre
Perdidas	220 W
Ancho cámara interna [B-M-O-F-C-N]	1

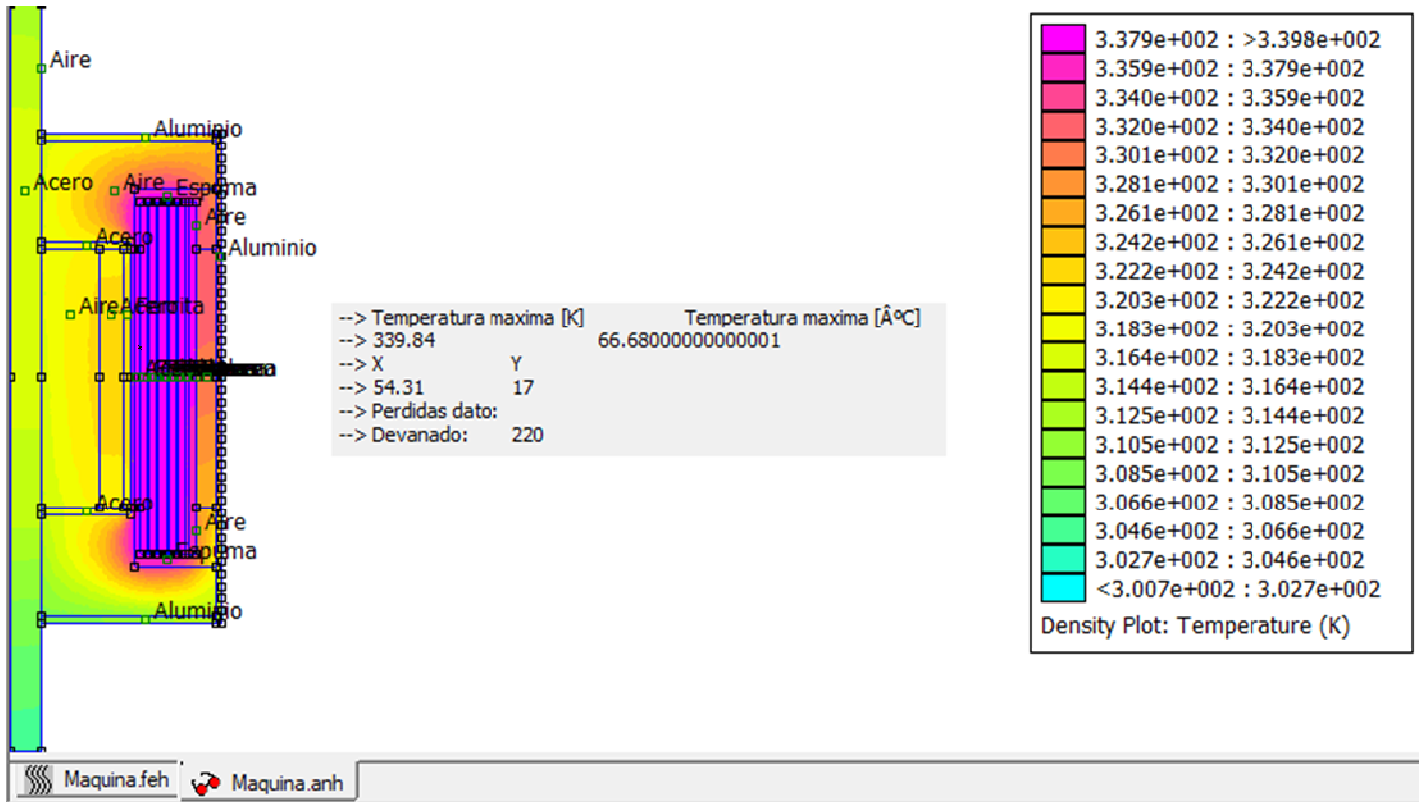


Figura 34.-Resultado de ejecutar el programa del anexo B con las características previamente definidas en la Tabla 9.

En esta ejecución del programa se ha activado solo la opción de “Búsqueda”. Por ello en el resultado únicamente se obtiene la temperatura máxima, en Kelvin y en grados Celsius, y las coordenadas de dónde se da dicha temperatura, marcada con una negra “x” Figura 34.

En esta ejecución del programa se ha activado solo la opción de “Búsqueda”. Por ello en el resultado únicamente se obtiene la temperatura máxima, en Kelvin y en grados Celsius, y las coordenadas de dónde se da dicha temperatura, marcada con una negra “x” la figura. Además, se obtiene el dato de pérdidas que se ha puesto al principio.

Una vez se ha obtenido la temperatura máxima se tiene que elegir la clase de aislante, Tabla 1, el método de cálculo de envejecimiento del aislamiento según la temperatura, 4.1 y calcular el envejecimiento, 4.4.

#### 4.4. Envejecimiento según la temperatura máxima en el aislamiento.

Una vez obtenida la temperatura máxima a la que está sometida el aislamiento en los tres ejemplos anteriores, 4.3, se procede a calcular la vida útil y a crear un registro de tal forma que se calcule la vida útil que le queda al material aislante.



Para completar la Tabla 1 y para obtener una vida útil inicial del aislamiento de la máquina eléctrica en función de la clase de aislamiento se estudia la norma IEC 60076-12, 1.5, dónde se obtiene para una temperatura ambiente de 20°C la Tabla 10.

Tabla 10.- Vida útil del aislamiento en función de la clase del aislamiento a 20°C.

Tipo de aislamiento	Temperatura máxima	Incremento máximo	Vida útil a 20°C
Clase A	105 °C	65 °C	$1.11 \cdot 10^{10}$ horas
Clase E	120 °C	80 °C	$1.73 \cdot 10^{10}$ horas
Clase B	130 °C	90 °C	$1.19 \cdot 10^{12}$ horas
Clase F	155 °C	115 °C	$2.07 \cdot 10^{14}$ horas
Clase H	180 °C	140 °C	$5.9 \cdot 10^{16}$ horas
Clase N	200 °C	160 °C	$7.75 \cdot 10^{18}$ horas
Clase R	220 °C	180°C	$1.39 \cdot 10^{21}$ horas

Se calcula la vida inicial del aislamiento mediante (38) y se recogen los datos en la Figura 35.

$$L_0 = a \cdot e^{\frac{b}{T_{amb}}} \quad (38)$$

Clase de aislamiento	a	b	Temperatura máxima
A	3,1E-14	15900	378,15
E	5,48E-16	17212	393,15
B	1,73E-15	18115	403,15
F	9,6E-17	20475	428,15
H	5,35E-18	22979	453,15
N	5,31E-19	25086	473,15
R	5,26E-20	27285	493,15

Temperatura ambiente	20	293,15
Clase de aislamiento	A	
Vida inicial	1,11E+10	
Temperatura maxima	378,15	

Figura 35.- Datos obtenidos de la norma 60076-12 y cálculo de la vida inicial mediante (38).

Tras realizar esto, en la hoja 2 del Excel “Vida” se aplican los métodos para calcular la vida útil de una máquina eléctrica, 4.1, aplicando únicamente el calentamiento de la temperatura ambiente obteniendo la Figura 36.

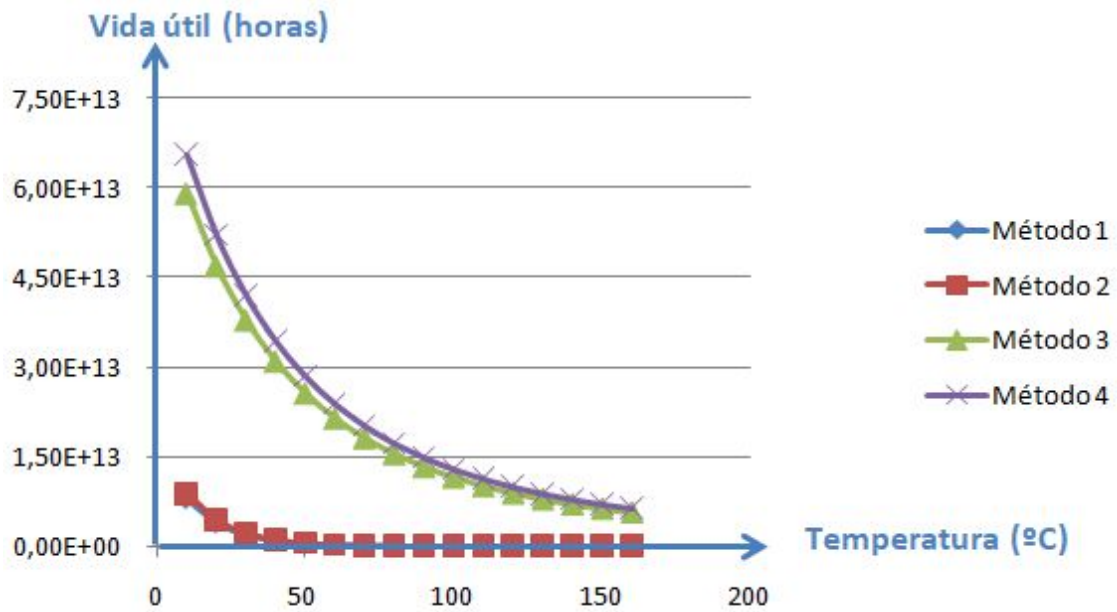


Figura 36.- Vida útil obtenida mediante 4 métodos en función de la temperatura.

Finalmente, en las últimas hojas de Excel y representado en la Figura 38 se encuentra un registro de cómo envejece el aislamiento en función de la temperatura máxima encontrada en la máquina eléctrica, 4.3, y del método escogido. En este caso en la Figura 38 se escoge el método 1 y el ciclo térmico de trabajo es el de la Figura 37.

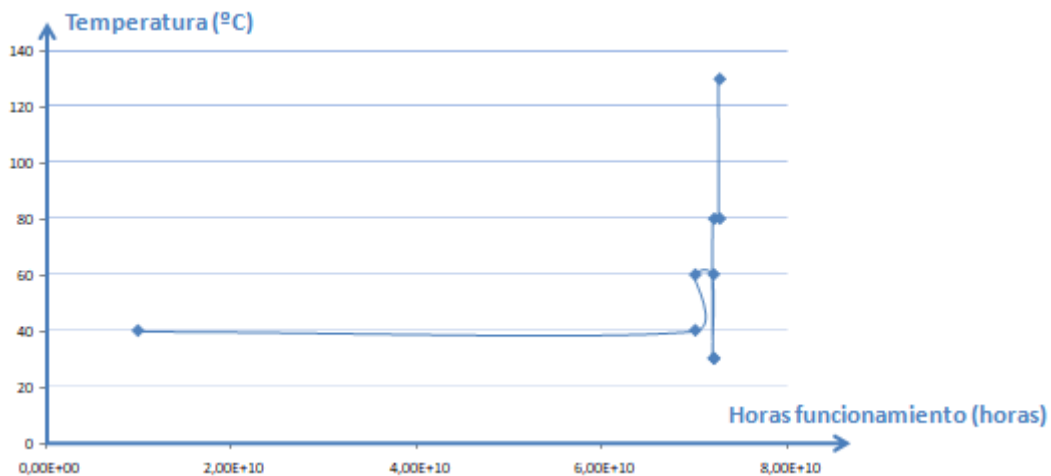


Figura 37.- Ciclo térmico de trabajo.

En la Figura 38 los valores que están en verde son los que puede modificar el usuario, el “%Restante” es una variable que indica cómo de envejecido está el aislante y “h\_tot\_func” son

Ciclo de trabajo según método 1

Número de ciclos1,80

	1,00E+00										
Temp_ciclo	T [K]	Max_h_1_vez	Max_h_perm	Horas usadas	Restante_T	%Usado_T	%Usado_nom	%Usado_acum	%Restante	h_tot_func	
40	313,15	1,01E+12	1,01E+12	1,00E+10	9,98E+11	0,99%	0,992%	0,99%	99,01%	1,00E+10	
60	333,15	2,52E+11	2,50E+11	6,00E+10	1,90E+11	24,05%	23,807%	24,80%	75,20%	7,00E+10	
80	353,15	2,02E+12	1,52E+12	2,00E+09	1,51E+12	0,13%	0,099%	24,90%	75,10%	7,20E+10	
100	373,15	6,30E+10	4,73E+10	5,00E+07	4,73E+10	0,11%	0,079%	24,98%	75,02%	7,21E+10	
130	403,15	1,97E+09	1,48E+09	6,00E+08	8,77E+08	40,62%	30,472%	55,45%	44,55%	7,27E+10	

las horas totales que lleva el aislamiento en funcionamiento.

Figura 38.-Envejecimiento del aislamiento en función de la temperatura máxima y las horas de trabajo de la máquina eléctrica.

En el anexo H se encuentran las fórmulas de la Figura 38 para calcular la vida útil del aislamiento y tener un control sobre el envejecimiento que puede ocasionar el estrés térmico.

#### 4.5.Comprobación térmica experimental del funcionamiento del modelo FEMM térmico.

Para poder validar el modelo de forma completa se necesitan conocer de forma precisa las características del objeto de prueba y sus condiciones de operación, para aplicarlas al modelo. Por otro lado, el modelo se ha generado teniendo en cuenta un conjunto de hipótesis que pueden no cumplirse en la realidad, bien por las condiciones de operación o bien por imperfecciones en el proceso de fabricación del objeto de prueba.

En el modelo desarrollado se ha tenido en cuenta las siguientes hipótesis: la distribución de la temperatura depende únicamente de las pérdidas, geometría y los materiales, la dependencia de las pérdidas en el devanado por el cambio de temperatura generado por el efecto Joule en los conductores, una refrigeración con un coeficiente de convección constante en las caras del devanado y una separación entre las espiras uniforme.

Pero la realidad dista mucho de estas condiciones ya que la refrigeración no suele ser constante; el fluido tiene diferentes temperaturas en cada punto debido al intercambio de calor, y la separación de las espiras no suele ser uniforme por lo que algunos conductores están más juntos y ocasionan la creación de otras zonas de máxima temperatura distintas a las que obtiene el programa.

La validación del modelo térmico queda fuera del alcance del presente proyecto, al necesitarse una gran cantidad de tiempo invertido para la realización de medidas con las que realimentarlo, y poder, en base a la experimentación, conocer de forma precisa los parámetros representativos del modelo (tanto geométricos como de condiciones de operación como de coeficientes de transferencia de calor) con los que realizar dicha validación.

No obstante, se presenta el procedimiento de medir en un transformador la temperatura en el devanado, para unas condiciones de operación determinadas en el anexo G.

## **5. Conclusión.**

Se han presentado varias formas de caracterizar el aislamiento y se ha planteado una nueva forma experimental con el uso del aparato LCR 6300 sobre un condensador. En este caso se ha caracterizado únicamente hasta 300 kHz sin llegar a obtener el comportamiento eléctrico del condensador en todo el espectro frecuencial. Este método aplicado al aislamiento de un devanado podría cumplir las expectativas esperadas.

También se han creado varios programas para crear un modelo de la máquina eléctrica o de sus devanados y así obtener el punto y el valor de máxima temperatura (hot spot) que se genera en el aislamiento del devanado de la máquina.

Junto con lo anterior se presenta también una forma de conocer, según las previsiones del año pasado, la temperatura ambiente equivalente a la que estará trabajando la máquina a lo largo del año o en las condiciones de trabajo que el usuario decida.

Una vez obtenida la temperatura en el aislamiento se consigue obtener la vida útil de la máquina cuando está trabajando en ciertas condiciones especificadas por el usuario. Además, se presenta una forma de trabajo para guardar los datos de envejecimiento y para saber en qué condiciones debe trabajar la máquina y controlar el envejecimiento de su vida útil.

Finalmente, se hace un estudio sobre la viabilidad de comprobar que el programa creado es válido para aplicarlo a máquinas reales y llega a la conclusión de que no es viable al no tenerse suficientes datos del objeto de prueba ni tiempo para realizar medidas y conocer los parámetros representativos del modelo.

## **6. Próximos pasos.**

1. Realizar un modelo similar al mostrado con la tensión, teniendo en cuenta las sobretensiones y las descargas parciales.
2. Relacionar los efectos de la máquina eléctrica producidos en la vida real con el porcentaje de envejecimiento obtenido para saber bajo ciertas condiciones de funcionamiento que puede llegar a ocurrir antes de que suceda.
3. En el caso de que el aislamiento sea realizado mediante métodos de impregnación, añadir un porcentaje aleatorio de huecos en el programa para tener en cuenta esta posibilidad y ver cómo evoluciona la temperatura y la tensión con la posibilidad de producirse descargas parciales.
4. Aplicar el método nuevo de caracterización de aislantes eléctricos de máquinas eléctricas con el LCR6300 a un ejemplo real y observar si se podría obtener una caracterización completa.
5. Comprobar que el programa LUA creado en este proyecto se corresponde con la el objeto de prueba de la realidad realizando una nube de medidas mediante la variación del coeficiente de convección y la distancia entre conductores

## 7. Bibliografía.

- [1] M. A. Vogelsberger, T. Wiesinger, and H. Ertl, "Life-cycle monitoring and voltage-managing unit for DC-link electrolytic capacitors in PWM converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 2, pp. 493–503, 2011.
- [2] "Tipos de aislamiento en conductores" [Online]. Available: <https://www.pinterest.es/pin/35888128256789312/>.
- [3] K. C. Agrawal, "Winding Insulation and its Maintenance," 2001.
- [4] E. M. Committee, *IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*, vol. 2000. 2001.
- [5] E. Development and P. G. Committee, "IEEE Standards," vol. 2004, no. November, 2004.
- [6] V. Endurance and E. I. Society, "IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form- Wound Bars and Coils," vol. 1996, 2009.
- [7] IEEE Power and Energy Society, *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*, vol. 2013. 2013.
- [8] IEC 60076-12, "Loading guide for dry-type power transformer.," 2008.
- [9] I. T. Industrial, A. Álvaro, and S. Blázquez, "Proyecto Fin de Carrera caracterización de sistemas de aislamiento en máquinas."
- [10] J. C. G. Wheeler, "Effects of converter pulses on the electrical insulation in low and medium voltage motors," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 21, no. 2, pp. 22–29, 2005.
- [11] CHAUVIN ARNOUX GROUP, "La medición del aislamiento," p. 28, 2010.
- [12] Fluke, "Medición del aislamiento".
- [13] Department of Defense of the USA, "Reliability Prediction of Electronic Equipment," *Mil. Handb. MIL-HDBK-217F*, p. 205, 1991.
- [14] T. F. De Máster, "Trabajo Fin de Máster 25%," 2007.
- [15] "Registro de temperaturas anuales": <https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/inicio>.
- [16] D. Meeker, "Manual del programa Lua."

- [17] D. Meeker, "Manual programa LUA- Calor," pp. 1–46, 2005.
- [18] I. Arata, F. Arrufat, and P. Palacios, "Variación de la resistencia con la temperatura," pp. 1–5, 2001.



## 8. Tabla de figuras.

Figura 1.- Fundamentos del aislante. ....	5
Figura 2.- Comportamiento interno de un condensador. ....	6
Figura 3.- Comportamiento del condensador según la frecuencia.[1] .....	6
Figura 4.- Aparato LCR 6300 de 4Fores. ....	7
Figura 5.- Tipos de aislamiento en los conductores activos. [2] .....	8
Figura 6.- Porcentaje de fallos de la máquina eléctrica. ....	12
Figura 7.- Deterioro experimental del aislante de tierra por excesiva temperatura.[9] .....	14
Figura 8.- Pico de tensión.[10] .....	14
Figura 9. Medida de pico de tensión en transistores GaN trabajando en puente en H con 100 ohmios de carga, a 210 kHz y 30 V de tensión de entrada. ....	15
Figura 10. (a) Huecos de aire dentro de la capa del aislante sometidos a un campo eléctrico.[9]	
(b) Generación de árboles eléctricos en el aislante. ....	17
Figura 11.- Comportamiento de un hueco en el aislante.....	18
Figura 12. Fuerzas producidas por bajas vibraciones en un par de bobinas de un devanado de un estator. ....	19
Figura 13.- Ejemplos de cortocircuitos y fallos en el devanado. ....	21
Figura 14.-Técnicas para la caracterización del envejecimiento del aislamiento. ....	22
Figura 15.- Gráfica dónde se recogen los resultados experimentales de la prueba de la resistencia equivalente serie con el tiempo.[1] .....	23
Figura 16. Definición de la tangente de $\delta$ . ....	24
Figura 17.- Componentes y valor de la corriente total por el aislamiento.[11] .....	26
Figura 18.- Esquema de funcionamiento para descargar el dieléctrico.....	34
Figura 19.- Circuitos equivalentes que se obtienen del LCR 6300. ....	35
Figura 20.- Circuito equivalente de análisis frecuencial del aislamiento. ....	36
Figura 21.- Valores del parámetro de resistencia en paralelo frente a la frecuencia. ....	37
Figura 22.- Valores en escala logarítmica del parámetro de la capacidad frente a la frecuencia. ....	37
Figura 23.- Dependencia de la tangente $\delta$ de la frecuencia.....	38
Figura 24.- Comportamiento de la impedancia del condensador con respecto a la frecuencia. ....	39
Figura 25.-Procedimiento de cálculos. ....	40
Figura 26.- Temperaturas del documento de texto abierto en Excel. ....	43
Figura 27.- Temperaturas máximas y mínimas durante los días del año.....	43
Figura 28.-Frecuencias de temperatura evaluadas en rangos de media hora durante el año. ..	44
Figura 29.- Máquina eléctrica con disposición de conductores alineados y representación de las variables del programa.....	48
Figura 30.- Resultado de ejecutar el programa del anexo A con disposición de conductores = 1 y características previamente definidas en la Tabla 7. ....	49
Figura 31.- Máquina eléctrica con disposición de conductores cruzados y representación de variables del programa.....	50
Figura 32.- Resultado de ejecutar el programa del anexo A con disposición de conductores = 2 y características previamente definidas en la Tabla 8. ....	51
Figura 33.- Máquina eléctrica y representación de variables del programa. ....	52

Figura 34.-Resultado de ejecutar el programa del anexo Dcon las características previamente definidas en laTabla 9.....	53
Figura 35.- Datos obtenidos de la norma 60076-12 y cálculo de la vida inicial mediante (38). .	54
Figura 36.- Vida útil obtenida mediante 4 métodos en función de la temperatura. ....	55
Figura 37.- Ciclo térmico de trabajo. ....	55
Figura 38.-Envejecimiento del aislamiento en función de la temperatura máxima y las horas de trabajo de la máquina eléctrica. ....	56
Figura 39.- Trozo de código del programa "Ejecutar_2" que muestra las variables a tener en cuenta.....	138
Figura 40.- Rangos de temperatura y veces que se ha dado dicha temperatura cada 0.5 horas. ....	139
Figura 41.- Recorte del Excel "Gráfica_h_T". ....	139
Figura 42.- Resultado del proceso "PorHorario". ....	140

## 9. Anexos.

### A. Programa LUA de los devanados de la máquina eléctrica según la disposición de conductores.

Es necesario, a la hora de ejecutar el programa, que previamente se haya creado un archivo vacío de texto denominadaod “Resultado\_Devanado.txt”.

```
showconsole()
```

```
clearconsole()
```

```
--INTERFAZ DEL USUARIO DIBUJO
```

```
-----DATOS-----
```

```
--Constantes
```

```
pi = 3.14159
```

```
inicio= 0
```

```
--dimensiones conductores y transformador
```

```
    -- Devanado
```

```
disposicion_conductores = 2 --Elige 1(Alineado) o 2(Cruzado)
```

```
espiras_serie=4
```

```
capas=4-- numero de capas totales
```

```
radio_primario = 1.55
```

```
separacion_espiras_nucleo = 1.2
```

```
conveccion_frontal= 30
```

```
conveccion_lateral=5
```

```
espesor= 0.01 --Espesor de la capa exterior para medir la conveccion frontal
```

```
capas_primario = 4 --Numero de capas en el primario
```

```
Porcentaje_perdidas_primario_porunidad = 1 -- Relación intensidad
```

```
profundo_total=40
```

gap\_2 = -1.1 --(Mínimo cruzado)-radio\_primario+espesor--(Mínimo alineado)(espiras\_serie-2)\*espesor --  
Diferencia vertical entre espiras (depende de la disposición)-- como mínimo

gap\_horizontal = 2\*radio\_primario -- Cómo mínimo en alineado (2\*espesor), en cruz (diámetro)

temperatura\_ambiente=15

-- Nucleo

alto\_nucleo=36

ancho\_nucleo= 10

--Pérdidas

perdidas\_w\_devanado= 2 -- Watios

perdidas\_w\_nucleo= 0 -- Watios

perdidas\_w\_conexion = 0 -- Watios

-- Selección de material

--Si eliges 1 el material para el devanado sera cobre, si eliges 2, será plata.

Material\_Devanado =1 -- o 2 o 1

--Si eliges 1 el material será aire para la conexión, si eliges 2, será espuma y 3 resina, 4 Epoxi, 5 Mica, 6 Fibra de vidrio, 7 Poliester

Material\_Conexion =3 -- o 1 o 2 o 3 o 4 o 5 o 6 o 7

--Opciones del usuario

Opcion="NO" -- Se utiliza cuando hay diferentes pérdidas en el primario y secundario para saber las reales. Se da un valor inicial de pérdidas y lo ajusta el programa iterando.

diferencia\_minima=3 --Valor mínimo de diferencia de temperaturas entre iteraciones--

Busqueda="Si"

--Calculos

seccion\_espiras = pi\*radio\_primario^2

diámetro\_primario = 2\* radio\_primario

capas\_secundario = capas- capas\_primario

Porcentaje\_perdidas\_secundario\_porunidad= 1- Porcentaje\_perdidas\_primario\_porunidad

--Saber si es par o impar

capas\_a=ceil(capas/2)

capas\_b=floor(capas/2)

perdidas\_w\_primario = perdidas\_w\_devanado\*Porcentaje\_perdidas\_primario\_porunidad -- Depende de la intensidad

perdidas\_w\_secundario = perdidas\_w\_devanado\*Porcentaje\_perdidas\_secundario\_porunidad -- Depende de la intensidad

-----  
if(capas==capas\_primario)then

diferencia\_temperatura\_secundario=0

end

if (disposicion\_conductores==1)then

Disp = " disposición alineada"

alto\_devanado = (espiras\_serie-1)\*(diametro\_primario+gap\_2)

else if( disposicion\_conductores==2)then

Disp= " disposición de cruz"

if (gap\_2<0)then

gap\_alineado = diametro\_primario+gap\_2 --2.2

gap\_y= 2\*gap\_alineado-diametro\_primario

alto\_devanado = (espiras\_serie-1)\*(diametro\_primario+gap\_y)

else if (gap\_2>=0) then

alto\_devanado = (2\*(espiras\_serie-1))\*(diametro\_primario+gap\_2)

end

end

end

```
end

--Diferenciar entre par o impar

if (disposicion_conductores==2)then

    if((capas_a-capas_b)==0)then

        EsPar = 1

    else

        EsPar = 0

        plus=-radio_primario

    end

end

end

--Materiales del transformador

if(Material_Devanado==1)then

    Material_Dev="Cobre"

else if(Material_Devanado==2)then

    Material_Dev="Plata"

end

end

if (Material_Conexion==1)then

    Material_C="Aire"

else if (Material_Conexion==2) then

    Material_C="Espuma"

else if (Material_Conexion==3)then

    Material_C= "Resina"

else if(Material_Conexion==4)then

    Material_C= "Epoxi"
```

```
else if(Material_Conexion==5)then

    Material_C= "Mica"

else if(Material_Conexion==6)then

    Material_C= "Fibra Vidrio"

else if(Material_Conexion==7)then

    Material_C= "Poliester"

end

end

end

end

end

end

end

end

--Dimensiones transformador

altura_diferencia_devanado_nucleo= (alto_nucleo-alto_devanado)/2

if(disposicion_conductores==1)then

    ancho_devanado      =      separacion_espiras_nucleo+      capas*diametro_primario-
radio_primario+gap_horizontal*(capas-1)

else

    ancho_devanado      =      separacion_espiras_nucleo+
ceil(capas/2)*diametro_primario+floor(capas/2)*gap_horizontal

end

--Calculos previos

if (disposicion_conductores==1) then

    Volumen_espiras_alineado=
(seccion_espiras*(2*profundo_total+2*ancho_nucleo))*(espiras_serie*capas)*10^-9
```

```
espiras_primario = capas_primario * espiras_serie

espiras_secundario = capas_secundario * espiras_serie

Volumen_primario      =      espiras_primario      *      10^-9      *
seccion_espiras*(2*profundo_total+2*ancho_nucleo)

Volumen_secundario    =      espiras_secundario    *      10^-9      *
seccion_espiras*(2*profundo_total+2*ancho_nucleo)

Perdidas_primario = perdidas_w_primario/Volumen_primario

Perdidas_secundario = perdidas_w_secundario/Volumen_secundario

else if (disposicion_conductores==2)then

    espiras_primario      =      ceil(capas_primario/2)*(espiras_serie-
1)+floor(capas_primario/2)*(espiras_serie)

    espiras_secundario    =      ceil(capas_secundario/2)*(espiras_serie-
1)+floor(capas_secundario/2)*(espiras_serie)

    Volumen_primario      =
(seccion_espiras*(2*profundo_total+2*ancho_nucleo))*(espiras_primario)*10^-9

    Volumen_secundario    =
(seccion_espiras*(2*profundo_total+2*ancho_nucleo))*(espiras_secundario)*10^-9

    Volumen_espiras_alineado=Volumen_primario+Volumen_secundario

    Perdidas_primario = perdidas_w_primario/Volumen_primario

    Perdidas_secundario = perdidas_w_secundario/Volumen_secundario

end

end

Volumen_Nucleo= alto_nucleo*ancho_nucleo*profundo_total*10^-9

Volumen_Conexion=      (alto_devanado*ancho_devanado)-
Volumen_espiras_alineado+(seccion_espiras*profundo_total*10^-9)*((espiras_serie-
1)*capas_primario)

newdocument(2)

--Generación_De_Materiales
```



```
hi_addmaterial('Cobre(1)', 401,401,Perdidas_primario) --devanado

hi_addmaterial('Cobre(2)', 401,401,Perdidas_secundario) --devanado

hi_addmaterial('Plata(1)', 410,410,Perdidas_primario) --devanado

hi_addmaterial('Plata(2)', 410,410,Perdidas_secundario) --devanado

hi_addmaterial('Ferrita',5,5,0)--nucleo

hi_addmaterial('Espuma',2,2,0)--conexion

hi_addmaterial('Aire',0.025,0.025,0) --conexion

hi_addmaterial('Poliester',0.275,0.275,0)

hi_addmaterial('Epoxi',0.34,0.34,0)

hi_addmaterial('Mica',0.35,0.35,0)

hi_addmaterial('Fibra Vidrio',0.04,0.04,0)

hi_addmaterial('Resina',0.566,0.566,0)

--Condiciones de contorno

hi_addboundprop('Tangencial_40', 2, 0, 0, temperatura_ambiente+273.15,conveccion_frontal, 0)

hi_addboundprop('Tangencial_5',2,0,0,temperatura_ambiente+273.15,conveccion_lateral,0)

hi_addboundprop('Periodic', 4,0,0,0,0,0)

--Generación_nucleo

Nucleo = {alto_nucleo,ancho_nucleo,inicio}

hi_addnode(inicio,inicio)

hi_addnode(inicio,Nucleo[1])

hi_addnode(Nucleo[2],inicio)

hi_addnode(Nucleo[2],Nucleo[1])

hi_addsegment(inicio,inicio,inicio,Nucleo[1])

hi_addsegment(inicio,inicio,Nucleo[2],inicio)

hi_addsegment(Nucleo[2],inicio,Nucleo[2],Nucleo[1])
```

```
hi_addsegment(Nucleo[2],Nucleo[1],inicio,Nucleo[1])

hi_addblocklabel(Nucleo[2]/2,Nucleo[1]/2);

hi_selectlabel(Nucleo[2]/2,Nucleo[1]/2);

hi_setblockprop('Ferrita',1,3,"");

hi_clearselected();

hi_selectsegment(inicio,alto_nucleo)

hi_setsegmentprop("Periodic","", "", "", "")

hi_clearselected()

hi_selectsegment(ancho_nucleo,alto_nucleo)

hi_setsegmentprop('Tangencial_5','', "", "", "")

hi_clearselected()

hi_selectsegment(ancho_nucleo,inicio)

hi_setsegmentprop('Tangencial_40','', "", "", "")

hi_clearselected()

hi_selectsegment(ancho_nucleo-espesor,alto_nucleo)

hi_setsegmentprop('Tangencial_40','', "", "", "")

hi_clearselected()

--Generación_devanado

Devanado = {alto_devanado,ancho_devanado,altura_diferencia_devanado_nucleo}

hi_addnode(Nucleo[2],Devanado[3])

hi_addnode(Nucleo[2],Devanado[3]+Devanado[1])

--Material separación exterior y devanado

hi_addblocklabel(Nucleo[2]+(separacion_espiras_nucleo/2),Nucleo[1]/2)

hi_selectlabel(Nucleo[2]+(separacion_espiras_nucleo/2),Nucleo[1]/2)

hi_setblockprop(Material_C,1,3,"");
```

```
hi_clearselected();

--Añado capa espesor

hi_addnode(Nucleo[2],Devanado[3]-espesor)

hi_addnode(Nucleo[2],Devanado[3]+Devanado[1]+espesor)

--material

hi_addblocklabel(Nucleo[2]+separacion_espiras_nucleo/2,Devanado[3]-(espesor)/2)

hi_selectlabel(Nucleo[2]+separacion_espiras_nucleo/2,Devanado[3]-(espesor)/2)

hi_setblockprop('Aire',1,3,"")

hi_clearselected()

--Inicialización de la generación de espiras

punto_izq ="true" -- Para iniciar el dibujo

con_extremo="true" -- Para iniciar el dibujo cuando es, además, disposición 2

ancho_minimo = Nucleo[2] + separacion_espiras_nucleo

altura_minima = altura_diferencia_devanado_nucleo

--generación espiras

if(disposicion_conductores==1)then

    gap_vertical= diametro_primario+ gap_2 --Distancia entre puntos A de espiras

    plus=radio_primario

else if (disposicion_conductores==2)then

    gap_vertical= gap_2+diametro_primario

end

end

if ((EsPar==0) or (disposicion_conductores==1))then

    anterior_X= Nucleo[2]
```

```
while(floor(altura_minima)<=floor(alto_devanado+altura_diferencia_devanado_nucleo) or
ceil(altura_minima)<=ceil(alto_devanado+altura_diferencia_devanado_nucleo) )do

    while((ceil(ancho_minimo)<=ceil(ancho_devanado+plus+Nucleo[2])) or
floor(ancho_minimo)<=floor(ancho_devanado+plus+Nucleo[2])) and
(ancho_minimo)<=(ancho_devanado+plus+Nucleo[2]))do

        if(punto_izq=="true")then

            --Añado puntos de circunferencia lado A

            hi_addnode(ancho_minimo,altura_minima)

            punto_izq="false"

            --Añado contorno de arriba y abajo y con if el espesor

            if (ceil(altura_minima) == ceil (altura_diferencia_devanado_nucleo)
or floor(altura_minima) == floor(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado) or
ceil(altura_minima) == ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado) or floor(altura_minima)
== floor(altura_diferencia_devanado_nucleo))then

                --Por debajo

                if(ceil(altura_minima) ==
ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo)) then

                    hi_addnode(ancho_minimo-espesor,altura_minima-
espesor) --Nodo espesor por abajo

                    if(anterior_X == Nucleo[2])then

                        hi_addsegment(anterior_X,altura_minima-
espesor,ancho_minimo-espesor,altura_minima-espesor)

                        --Contorno(1)

                        hi_selectsegment(anterior_X,altura_minima-espesor)

                        else if (anterior_X ~= Nucleo[2])then

                            hi_addsegment(anterior_X+espesor,altura_minima-espesor,ancho_minimo-
espesor,altura_minima-espesor)
```

```
--Contorno(1)

hi_selectsegment(anterior_X,altura_minima-espesor)

end

end

hi_setsegmentprop('Tangencial_5','','','')

hi_clearselected()

end --Fin contorno abajo

--Por encima

if( (floor(altura_minima) ==
floor(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado) or ceil(altura_minima) == ceil
(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado)))then

hi_addnode(ancho_minimo-
espesor,altura_minima+espesor) --Nodo espesor por arriba

if(anterior_X == Nucleo[2]) then

hi_addsegment(anterior_X,altura_minima+espesor,ancho_minimo-
espesor,altura_minima+espesor)

--Contorno(1)

hi_selectsegment(anterior_X,altura_minima+espesor)

else if (anterior_X ~= Nucleo[2]) then

hi_addsegment(anterior_X+espesor,altura_minima+espesor,ancho_minimo-
espesor,altura_minima+espesor)

--Contorno(1)

hi_selectsegment(anterior_X+espesor,altura_minima+espesor)
```

```
end

end

--Contorno(2)

hi_setsegmentprop('Tangencial_5','','','','')

hi_clearselected()

end-- Fin contorno arriba


hi_addsegment(anterior_X,altura_minima,ancho_minimo,altura_minima)

end

anterior_X=ancho_minimo

ancho_minimo=ancho_minimo+diametro_primario

if(punto_izq=="false")then

--Añado puntos de circunferencia lado B y espesor

hi_addnode(ancho_minimo,altura_minima)

punto_izq="true"

if (ceil(altura_minima) ==
ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo) or floor(altura_minima)==
floor(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado)or
ceil(altura_minima)==ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado))then

--Por debajo

if(ceil(altura_minima) ==
ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo)) then

hi_addnode(ancho_minimo+espesor,altura_minima-espesor)

hi_addarc(anterior_X-
espesor,altura_minima-espesor,ancho_minimo+espesor,altura_minima-espesor,180,3)

--Contorno(1)
```

```
hi_selectarcsegment(anterior_X-
espesor,altura_minima-espesor)

end

--Por encima

if(floor(altura_minima) ==
floor(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado) or ceil(altura_minima)==ceil
(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado))then

hi_addnode(ancho_minimo+espesor,altura_minima+espesor)

hi_addarc(ancho_minimo+espesor,altura_minima+espesor,anterior_X-
espesor,altura_minima+espesor,180,3)

--Contorno(1)

hi_selectarcsegment(ancho_minimo+espesor,altura_minima+espesor)

end

--Contorno(2)

hi_setarcsegmentprop(1,'Tangencial_5',"","")

hi_clearselected()

end

hi_addarc(anterior_X,altura_minima,ancho_minimo,altura_minima,180,3)

hi_addarc(ancho_minimo,altura_minima,anterior_X,altura_minima,180,3)

-- Material

hi_addblocklabel(ancho_minimo-
radio_primario,altura_minima)

hi_selectlabel(ancho_minimo-
radio_primario,altura_minima)
```

```
if(Material_Devanado==1)then

    if (ancho_minimo-
radio_primario<(ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+capas_primario*diametro_primario) )then

        hi_setblockprop('Cobre(1)',1,3,")

    else

        hi_setblockprop('Cobre(2)',1,3,")

    end

end

else if( Material_Devanado==2) then

    if ((ancho_minimo-
radio_primario)<(ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+capas_primario*diametro_primario))then

        hi_setblockprop('Plata(1)',1,3,")

    else

        hi_setblockprop('Plata(2)',1,3,")

    end

end

end

end

hi_clearselected()

anterior_X=ancho_minimo

if(disposicion_conductores==2 and
gap_horizontal<radio_primario and
((ancho_minimo+gap_horizontal)<(ancho_nucleo+ancho_devanado-radio_primario))and
((ancho_minimo+gap_horizontal)>(ancho_nucleo+espiras_primario+floor(capas/2)*diametro_primario+
floor(capas/4)*gap_horizontal))))then

    ancho_minimo=ancho_nucleo+ancho_devanado+espesor

else
```



```
                                ancho_minimo=ancho_minimo+gap_horizontal

                                end

                                end

                                end

                                if (EsPar ==0 ) then

                                if((ceil(ancho_minimo)==ceil(ancho_devanado+Nucleo[2]+gap_horizontal) or
                                floor(ancho_minimo)==floor(ancho_devanado+Nucleo[2]+gap_horizontal)))then

                                con_extremo="false"

                                else

                                con_extremo="true"

                                end

                                end

                                if (con_extremo=="true")then

                                anterior_X=Nucleo[2]

                                ancho_minimo = Nucleo[2] + separacion_espiras_nucleo

                                punto_izq="true"

                                else if (con_extremo == "false") then

                                anterior_X= Nucleo[2]

                                ancho_minimo = Nucleo[2] + separacion_espiras_nucleo + gap_horizontal

                                end

                                end

                                altura_minima=altura_minima+gap_vertical

                                end

                                -----

                                else if (EsPar==1)then
```

```
anterior_X= Nucleo[2]

siguiente_extremo="seguir"

while(floor(altura_minima)<=floor(alto_devanado+altura_diferencia_devanado_nucleo) or
ceil(altura_minima)<=ceil(alto_devanado+altura_diferencia_devanado_nucleo) )do

    while((ceil(ancho_minimo)<=ceil(ancho_devanado+Nucleo[2]-radio_primario)
or floor(ancho_minimo)<=floor(ancho_devanado+Nucleo[2]-radio_primario)) and
(ancho_minimo)<=(ancho_devanado+Nucleo[2]-radio_primario))do

        punto_izq="true"

        if(punto_izq=="true")then

            --Añado puntos de circunferencia lado A

            hi_addnode(ancho_minimo,altura_minima)

            punto_izq="false"

            --Añado contorno de arriba y abajo y con if el espesor

            if (ceil(altura_minima) == ceil
(altura_diferencia_devanado_nucleo) or floor(altura_minima) ==
floor(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado) or ceil(altura_minima) ==
ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado) or floor(altura_minima) ==
floor(altura_diferencia_devanado_nucleo))then

                --Por debajo

                if(ceil(altura_minima) ==
ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo)) then

                    hi_addnode(ancho_minimo-
espesor,altura_minima-espesor) --Nodo espesor por abajo

                    if(anterior_X == Nucleo[2])then

                        hi_addsegment(anterior_X,altura_minima-espesor,ancho_minimo-espesor,altura_minima-
espesor)

                        --Contorno(1)
```

```
hi_selectsegment(anterior_X,altura_minima-espesor)

else if (anterior_X ~= Nucleo[2])then

hi_addsegment(anterior_X+espesor,altura_minima-espesor,ancho_minimo-
espesor,altura_minima-espesor)

--Contorno(1)

hi_selectsegment(anterior_X,altura_minima-espesor)

end

end

hi_setsegmentprop('Tangencial_5',' ',' ',' ',' ')

hi_clearselected()

end --Fin contorno abajo

--Por encima

if(floor(altura_minima) ==
floor(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado) or ceil(altura_minima) == ceil
(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado))then

hi_addnode(ancho_minimo-
espesor,altura_minima+espesor) --Nodo espesor por arriba

if(anterior_X == Nucleo[2]) then

hi_addsegment(anterior_X,altura_minima+espesor,ancho_minimo-
espesor,altura_minima+espesor)

--Contorno(1)

hi_selectsegment(anterior_X,altura_minima+espesor)
```

```
else if (anterior_X ~= Nucleo[2]) then

    hi_addsegment(anterior_X+espesor,altura_minima+espesor,ancho_minimo-
    espesor,altura_minima+espesor)

    --Contorno(1)

    hi_selectsegment(anterior_X+espesor,altura_minima+espesor)

    end

    end

    --Contorno(2)

    hi_setsegmentprop('Tangencial_5','','','','')

    hi_clearselected()

    end-- Fin contorno arriba

    hi_addsegment(anterior_X,altura_minima,ancho_minimo,altura_minima)

    end

    anterior_X=ancho_minimo

    ancho_minimo=ancho_minimo+diametro_primario

    if(punto_izq == "false")then

        --Añado puntos de circunferencia lado B y espesor

        hi_addnode(ancho_minimo,altura_minima)

        punto_izq="true"

        -----
```

```

                                if                                ((ceil(ancho_minimo)                                ==
ceil(ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(capas/2)*diametro_primario+(capas/2-
1)*gap_horizontal))                                or
(floor(ancho_minimo)==floor(ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(capas/2)*diametro_primario+
(capas/2-1)*gap_horizontal)))then

                                siguiente_extremo= "true"

                                else

                                siguiente_extremo="seguir"

                                end

                                -----

                                if                                (ceil(altura_minima)                                ==
ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo)                                or                                floor(altura_minima)==
floor(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado)or
ceil(altura_minima)==ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado))then

                                --Por debajo

                                if(ceil(altura_minima)                                ==
ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo)) then

                                hi_addnode(ancho_minimo+espesor,altura_minima-espesor)

                                hi_addarc(anterior_X-
espesor,altura_minima-espesor,ancho_minimo+espesor,altura_minima-espesor,180,3)

                                --Contorno(1)

                                hi_selectarcsegment(anterior_X-
espesor,altura_minima-espesor)

                                end

                                --Por encima

                                if(floor(altura_minima)                                ==
floor(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado)                                or                                ceil(altura_minima)==ceil
(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado))then
```

```
hi_addnode(ancho_minimo+espesor,altura_minima+espesor)

hi_addarc(ancho_minimo+espesor,altura_minima+espesor,anterior_X-
espesor,altura_minima+espesor,180,3)

--Contorno(1)

hi_selectarcsegment(ancho_minimo+espesor,altura_minima+espesor)

end

--Contorno(2)

hi_setarcsegmentprop(1,'Tangencial_5',"","")

hi_clearselected()

end

hi_addarc(anterior_X,altura_minima,ancho_minimo,altura_minima,180,3)

hi_addarc(ancho_minimo,altura_minima,anterior_X,altura_minima,180,3)

-- Material

if (ceil(ancho_minimo-radio_primario) >=
ceil(ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+radio_primario) and (ceil(ancho_minimo-
radio_primario) <= ceil(ancho_nucleo+ancho_devanado-radio_primario)))then

hi_addblocklabel(ancho_minimo-
radio_primario,altura_minima)

hi_selectlabel(ancho_minimo-
radio_primario,altura_minima)

if(Material_Devanado==1)then
```

```

                                if                                ((ancho_minimo-
radio_primario)<(ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+capas_primario*diametro_primario))then

                                hi_setblockprop('Cobre(1)',1,3,")

                                else

                                hi_setblockprop('Cobre(2)',1,3,")

                                end

                                end

                                else if( Material_Devanado==2) then

                                if                                ((ancho_minimo-
radio_primario)>(ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+capas_primario*diametro_primario))then

                                hi_setblockprop('Plata(1)',1,3,")

                                else

                                hi_setblockprop('Plata(2)',1,3,")

                                end

                                end

                                end

                                end

                                hi_clearselected()

                                anterior_X=ancho_minimo

                                ancho_minimo=ancho_minimo+gap_horizontal

                                if                                (ancho_minimo>=(ancho_nucleo+
(capas/2)*diametro_primario+separacion_espiras_nucleo+(capas/2-1)*gap_horizontal))then

                                if                                (altura_minima                                ==
altura_diferencia_devanado_nucleo                                or                                ceil(altura_minima)                                ==
ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado)                                or                                floor                                (altura_minima)                                ==
```

```
floor(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado))then

                                ancho_x = ancho_minimo - radio_primario

                                hi_addnode(ancho_x,altura_minima)

                                if      (altura_minima      ==
altura_diferencia_devanado_nucleo)then

                                hi_addnode(ancho_x+espesor,altura_minima-espesor)

                                hi_addsegment(anterior_X,
altura_diferencia_devanado_nucleo, ancho_x, altura_diferencia_devanado_nucleo)

                                hi_addsegment(anterior_X+
espesor,      altura_diferencia_devanado_nucleo-espesor,      ancho_x+espesor,
altura_diferencia_devanado_nucleo-espesor)

                                else      if((ceil(altura_minima)      ==
ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado))      or(floor(altura_minima)      ==
floor(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado)) )then

                                hi_addnode(ancho_x,altura_minima)

                                hi_addnode(
ancho_x+espesor,alto_devanado+altura_diferencia_devanado_nucleo+espesor)

                                hi_addsegment(anterior_X,
alto_devanado+altura_diferencia_devanado_nucleo,      ancho_x,
altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado)

                                hi_addsegment(anterior_X+espesor,alto_devanado+
altura_diferencia_devanado_nucleo+espesor,
ancho_x+espesor,alto_devanado+altura_diferencia_devanado_nucleo+espesor)

                                end
```



```
end

end

end

end

end    --Fin while x

altura_minima=altura_minima+gap_vertical

if (siguiente_extremo=="true")then

    anterior_X= Nucleo[2]

    ancho_minimo  =  Nucleo[2]  +  separacion_espiras_nucleo  +
gap_horizontal

    siguiente_extremo ="seguir"

else

    anterior_X=Nucleo[2]

    ancho_minimo = Nucleo[2] + separacion_espiras_nucleo

    siguiente_extremo = "true"

end

end

hi_selectsegment(ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo/2,altura_diferencia_devanado_nu
cleo-espesor)

hi_setsegmentprop('Tangencial_5',"","","","")

hi_clearselected()

hi_selectsegment(ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo/2,altura_diferencia_devanado_nu
cleo+alto_devanado+espesor)

hi_setsegmentprop('Tangencial_5',"","","","")
```

```
hi_clearselected()

hi_selectsegment(ancho_nucleo+ancho_devanado-radio_primario-
espesor,altura_diferencia_devanado_nucleo-espesor)

hi_setsegmentprop('Tangencial_5','','','','')

hi_clearselected()

hi_selectsegment(ancho_nucleo+ancho_devanado-radio_primario-
espesor,altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado+espesor)

hi_setsegmentprop('Tangencial_5','','','','')

hi_clearselected()

end

end

if ( disposicion_conductores==1 or EsPar==0)then

j=altura_diferencia_devanado_nucleo+radio_primario

if (disposicion_conductores==1)then

anchura_exterior_devanado= Nucleo[2]+Devanado[2]

end

if(EsPar==0 and disposicion_conductores==2)then

anchura_exterior_devanado= Nucleo[2]+Devanado[2]-radio_primario

end

if (disposicion_conductores==1)then

gap_vertical_2= gap_2

else if (disposicion_conductores==2) then

if (gap_2<0)then

gap_vertical_2= gap_y

else if (gap_2>=0) then
```

```
gap_vertical_2 = 2* gap_2+ diametro_primario

end

end

end

end

while (j<(Devanado[1]+Devanado[3]-radio_primario)) do

    hi_addnode(anchura_exterior_devanado, j)

    hi_addnode(anchura_exterior_devanado+espesor, j+espesor) --espesor

    jant=j

    j=j+gap_vertical_2

    hi_addnode(anchura_exterior_devanado,j)

    hi_addnode(anchura_exterior_devanado+espesor,j-espesor) -- espesor

    hi_addsegment(anchura_exterior_devanado,jant,anchura_exterior_devanado,j)

    hi_addsegment(anchura_exterior_devanado+espesor,jant+          espesor
,anchura_exterior_devanado+espesor,j-espesor) --espesor

    hi_selectsegment(anchura_exterior_devanado+espesor,jant+ espesor)

    hi_setsegmentprop('Tangencial_40',"","","")

    hi_clearselected()

    if (jant==altura_diferencia_devanado_nucleo+radio_primario) then

        hi_addarc(anchura_exterior_devanado+radio_primario+espesor,jant-
radio_primario-espesor,anchura_exterior_devanado+espesor ,jant+espesor,90,3)

        --Contorno

        hi_selectarcsegment(anchura_exterior_devanado+espesor,jant+espesor)

        hi_setarcsegmentprop(1,'Tangencial_40',"","")
```

```
hi_clearselected()

else

    hi_addarc(anchura_exterior_devanado+espesor,jant-diametro_primario-
espesor,anchura_exterior_devanado+espesor,jant+espesor,180,3)

    --Contorno

    hi_selectarcsegment(anchura_exterior_devanado+espesor,jant-
diametro_primario-espesor)

    hi_setarcsegmentprop(1,'Tangencial_40',"","")

    hi_clearselected()

end

--Última condición para cumplir el contorno lateral de arriba del espesor

if(ceil(j)==ceil(Devanado[1]+Devanado[3]-radio_primario)                or
floor(j)==floor(Devanado[1]+Devanado[3]-radio_primario) )then

    hi_addarc(anchura_exterior_devanado+espesor,j-
espesor,anchura_exterior_devanado+espesor+radio_primario,j+espesor+radio_primario,90,3)

    --Contorno

    hi_selectarcsegment(anchura_exterior_devanado+espesor,j-espesor)

    hi_setarcsegmentprop(1,'Tangencial_40',"","")

    hi_clearselected()

    j=j+diametro_primario

end

j=j+diametro_primario

end

else if( EsPar==1)then

    j=altura_diferencia_devanado_nucleo

    anchura_exterior_devanado= Nucleo[2]+Devanado[2]-radio_primario
```

```
if (disposicion_conductores==1)then

    gap_vertical_2= gap_2

else if (disposicion_conductores==2) then

    if (gap_2<0)then

        gap_vertical_2= gap_y

    else if (gap_2>=0) then

        gap_vertical_2 = 2* gap_2+ diametro_primario

    end

end

end

end

while (j<(Devanado[1]+Devanado[3])) do

    if(j==altura_diferencia_devanado_nucleo )then

        hi_addnode(anchura_exterior_devanado, j)

        hi_addnode(anchura_exterior_devanado+espesor,j-espesor)--

        jant= j

        j=j+gap_vertical_2/2

        hi_addnode(anchura_exterior_devanado,j)

        hi_addnode(anchura_exterior_devanado+espesor,j-espesor) -- espesor

        hi_addsegment(anchura_exterior_devanado,

jant,anchura_exterior_devanado,j)

        hi_addsegment(anchura_exterior_devanado+espesor,jant-

espesor,anchura_exterior_devanado+espesor,j-espesor)

        --Contorno

        hi_selectsegment(anchura_exterior_devanado,jant-espesor)

        hi_setsegmentprop("Tangencial_5","","","") --espesor
```

```
hi_clearselected()

jant = j

hi_selectsegment(anchura_exterior_devanado,jant-espesor)

hi_setsegmentprop('Tangencial_5',' ',' ',' ') --espesor

hi_clearselected()

else

hi_addnode(anchura_exterior_devanado, j)

hi_addnode(anchura_exterior_devanado+espesor, j+espesor) --espesor

if
((j+gap_vertical_2)<(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado))then

    jant=j

    j=j+gap_vertical_2

    hi_addnode(anchura_exterior_devanado,j)

    hi_addnode(anchura_exterior_devanado+espesor,j-espesor)    --
    espesor

    hi_addsegment(anchura_exterior_devanado,
jant,anchura_exterior_devanado, j)

    hi_addsegment(anchura_exterior_devanado+espesor,
jant+espesor,anchura_exterior_devanado + espesor, j-espesor)--espesor

    --Contorno

    hi_selectsegment(anchura_exterior_devanado+espesor,jant+
    espesor)

    hi_setsegmentprop('Tangencial_40',' ',' ',' ') --espesor

    hi_clearselected()

    hi_addarc(anchura_exterior_devanado+espesor,jant-
diametro_primario-espesor,anchura_exterior_devanado+espesor,jant+espesor,180,2)

    --Contorno
```

```
hi_selectarcsegment(anchura_exterior_devanado+espesor,jant-
diametro_primario-espesor)

hi_setarcsegmentprop(1,'Tangencial_40',"","")

hi_clearselected()

else

hi_addnode(anchura_exterior_devanado+espesor,
altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado+espesor)

hi_addsegment(anchura_exterior_devanado,
j,anchura_exterior_devanado,alto_devanado+altura_diferencia_devanado_nucleo)

hi_addsegment(anchura_exterior_devanado+espesor,
j+espesor,anchura_exterior_devanado+espesor,alto_devanado+altura_diferencia_devanado_nucleo+
espesor) --espesor

--Contorno

hi_selectsegment(anchura_exterior_devanado+espesor,j+espesor)

hi_setsegmentprop('Tangencial_40',"","","") --espesor

hi_clearselected()

hi_selectsegment(anchura_exterior_devanado,alto_devanado+altura_diferencia_devanado_nu
cleo+ espesor)

hi_setsegmentprop('Tangencial_5',"","","") --espesor

hi_clearselected()

hi_addarc(anchura_exterior_devanado+espesor,j-
diametro_primario-espesor,anchura_exterior_devanado+espesor,j+espesor,180,2)

--contorno

hi_selectarcsegment(anchura_exterior_devanado+espesor,j-
diametro_primario-espesor)

hi_setarcsegmentprop(1,'Tangencial_40',"","")

hi_clearselected()
```

```

        end

    end

    j=j+diametro_primario

end

end

end

--Ejecución del programa

--INTERFAZ DEL USUARIO

Suma=0

Factor_termico= 3.9*10^-3

conveccion_frontal=40

perdidas_w_devanado=8

i=1

Conductor=1

X= Nucleo[2]+radio_primario+separacion_espiras_nucleo

Y= altura_diferencia_devanado_nucleo

Temperatura_anterior_primario = 20

Temperatura_anterior_secundario = 20

Temperatura_sumada_primario = 0

Temperatura_sumada_secundario = 0

diferencia_temperatura_primario= 5

diferencia_temperatura_secundario=5

if(disposicion_conductores==1)then

    primarios

    ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+capas_primario*diametro_primario+(capas-1)*gap_horizontal

    =
```



```
else if( disposicion_conductores==2)then

    primarios=
    ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+capas_primario*diametro_primario+(capas-
    1)*(gap_horizontal-diametro_primario)

end

end

hi_saveas("temperatura.feh")

hi_probdef("millimeters","planar",1E-8,profundo_total,30)

hi_analyze(1) -- 0 no minimiza la ventana, 1 si

hi_loadsolution()

if(Busqueda=="Si")then

    X= ancho_nucleo

    Temperatura_maxima=0

    Y= altura_diferencia_devanado_nucleo

    paso_x=0.1

    paso_y=0.1

    n=1

    m=1

    while (X<ancho_nucleo+ancho_devanado)do

        while(Y<altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado)do

            while (n<=capas)do

                while (m<=espiras_serie)do

                    if(disposicion_conductores==1)then

                        if(

                            ((X<ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo))or

                            ((X>ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n)*diametro_primario+(n-1)*gap_horizontal)and

                            (X<ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n)*diametro_primario+(n)*gap_horizontal)))then
```

```

                                Temperatura_med                =
ho_getpointvalues(X,Y)

                                Dentro = "A"

                                else                                if(
((X>ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n-1)*diametro_primario+(n-1)*gap_horizontal)    and
(X<ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n)*diametro_primario+(n-1)*gap_horizontal)) )then

                                if(                                (Y
>altura_diferencia_devanado_nucleo+radio_primario + (m-1)*gap_2+ (m-1)*diametro_primario) and
(Y<altura_diferencia_devanado_nucleo+radio_primario + (m)*gap_2+ (m-1)*diametro_primario))then

                                Temperatura_med                =
ho_getpointvalues(X,Y)

                                Dentro = "A"

                                end

                                end

                                end

                                if(Temperatura_med>Temperatura_maxima    and
Dentro == "A")then

                                Temperatura_maxima=Temperatura_med

                                Dentro = "B"

                                X1=X

                                Y1=Y

                                end

                                end

                                if (disposicion_conductores==2)then

                                if(
X<ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo)then
```

```

                                Temperatura_med                =
ho_getpointvalues(X,Y)

                                Dentro = "A"

                                else

if((X>ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n-1)*gap_horizontal+(n-1)*diametro_primario)    and
(X<ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n-1)*gap_horizontal+(n)*diametro_primario))then

                                if((Y>altura_diferencia_devanado_nucleo+radio_primario+(m-1)*2*gap_vertical+(m-
1)*diametro_primario)and(Y<altura_diferencia_devanado_nucleo+radio_primario+(m)*2*gap_vertical+
(m-1)*diametro_primario))then

                                Temperatura_med                =

ho_getpointvalues(X,Y)

                                Dentro = "A"

                                end

                                else

                                if(
((X>ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n)*diametro_primario+(n-1)*gap_horizontal)    and
(X<ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n)*diametro_primario+(n)*gap_horizontal)))then

                                if(((Y>altura_diferencia_devanado_nucleo+(m-1)*2*gap_vertical-
gap_vertical+radio_primario)and(Y<altura_diferencia_devanado_nucleo+(m-
1)*2*gap_vertical+gap_vertical-radio_primario)))then

                                Temperatura_med                =

ho_getpointvalues(X,Y)

                                Dentro = "A"

                                end

                                else

if((X>ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(capas-
1)*diametro_primario)and(X<ancho_nucleo+ancho_devanado-radio_primario))then

                                if((Y>altura_diferencia_devanado_nucleo+(m-1)*2*gap_vertical-

```

```
gap_vertical+radio_primario)and(Y<altura_diferencia_devanado_nucleo+(m-
1)*2*gap_vertical+gap_vertical-radio_primario))then

                                Temperatura_med          =

ho_getpointvalues(X,Y)

                                Dentro = "A"

                                end

                                end

                                end

                                end

                                end

                                if(Temperatura_med==nil)then

                                    Temperatura_med=0

                                end

                                if(Temperatura_med>Temperatura_maxima    and

Dentro == "A")then

                                Temperatura_maxima=Temperatura_med

                                Dentro = "B"

                                X1=X

                                Y1=Y

                                end

                                end

                                m=m+1

                                end

                                m=1

                                n=n+1
```

```
end

n=1

Y= Y+paso_y

end

Y=altura_diferencia_devanado_nucleo

X=X+paso_x

end

X= ancho_nucleo

end

if (Opcion=="Si")then

    hfile = fopen("Resultado_Devanado.txt","a+")

    write(hfile,"Las espiras se encuentran en ",Disp, ". El conductor está hecho de ",Material_Dev,"
y el aislante de ",Material_C,"\n")

    write(hfile,"Conductor", " ", "Perdidas [W]", " ", "Conveccion frontal [W/(m^2·K)]", "
", "Temperatura [K]", " ", "Temperatura [°C]", "\n")

    hi_deleteboundprop('Tangencial_40')

    hi_addboundprop('Tangencial_40', 2, 0, 0, 285, conveccion_frontal, 0)

    -----

    while (diferencia_temperatura_primario > diferencia_minima and
diferencia_temperatura_primario > diferencia_minima)do

        if(Material_Devanado==1)then

            hi_deletematerial('Cobre(1)')

            hi_deletematerial('Cobre(2)')

            hi_addmaterial('Cobre(1)', 401, 401, Perdidas_primario)

            hi_addmaterial('Cobre(2)', 401, 401, Perdidas_secundario)

        else if(Material_Devanado==2)then
```

Proyecto fin de grado de Ingeniería Eléctrica.

```
hi_deletematerial('Plata(1)')

hi_deletematerial('Plata(2)')

hi_addmaterial('Plata(1)', 401,401,Perdidas_primario)

hi_addmaterial('Plata(2)', 401,401,Perdidas_secundario)

end

end

Frase="Heat_completo_1"

Suma=Suma+1

Falta_feh=Frase..Suma;

Completo=Falta_feh.."feh"

hi_saveas(Completo)

hi_probdef("millimeters","planar",1E-8,profundo_total,30)

hi_analyze(1) -- 0 no minimiza la ventana, 1 si

hi_loadsolution()

while(ceil(X)<=ceil(anchura_exterior_devanado+radio_primario))do

    while (ceil(Y)<=ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado))do

        Temperatura=( ho_getpointvalues(X,Y)-273.15)

        write(hfile," ",Conductor,"

",perdidas_w_devanado," ",conveccion_frontal," ",Temperatura,"

","°C", "\n")

        if(disposicion_conductores==1)then

            Y=Y+gap_vertical

        else if(disposicion_conductores==2)then

            Y=Y+2*gap_vertical

        end

    end

end
```

Proyecto fin de grado de Ingeniería Eléctrica.

```
Conductor=Conductor+1

if (X<primarios)then

    Temperatura_sumada_primario =
Temperatura_sumada_primario+ Temperatura

    else

    Temperatura_sumada_secundario =
Temperatura_sumada_secundario+ Temperatura

    end

end

if(disposicion_conductores==1)then

    Y=altura_diferencia_devanado_nucleo

    X=X+gap_horizontal+diametro_primario

    else if((disposicion_conductores==2) and (EsPar==1))then

        X=X+(gap_horizontal/2)+radio_primario

        if(((ceil(Y-
2*gap_vertical)==ceil(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado) or floor(Y-
2*gap_vertical)==floor(altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado)) and
(disposicion_conductores==2))))then

            Y=altura_diferencia_devanado_nucleo+gap_vertical

        else

            Y = altura_diferencia_devanado_nucleo

        end

    end

end

end

Temperatura_dev_promedio_primario =
Temperatura_sumada_primario/(espiras_primario)
```

```
Factor_correccion_temperatura_primario = (Temperatura_dev_promedio_primario-  
temperatura_ambiente)*Factor_termico+1
```

```
diferencia_temperatura_primario=Temperatura_dev_promedio_primario-  
Temperatura_anterior_primario
```

```
Perdidas_primario =  
Factor_correccion_temperatura_primario*perdidas_w_primario/Volumen_primario
```

```
if (capas==capas_primario)then
```

```
    Temperatura_dev_promedio_secundario=0
```

```
    Factor_correccion_temperatura_secundario=0
```

```
    diferencia_temperatura_secundario=0
```

```
    Perdidas_secundario=0
```

```
else
```

```
    Temperatura_dev_promedio_secundario =  
    Temperatura_sumada_secundario/(espiras_secundario)
```

```
    Factor_correccion_temperatura_secundario =  
    (Temperatura_dev_promedio_secundario-temperatura_ambiente)*Factor_termico+1
```

```
    diferencia_temperatura_secundario=Temperatura_dev_promedio_secundario-  
    Temperatura_anterior_secundario
```

```
    Perdidas_secundario =  
    Factor_correccion_temperatura_secundario*perdidas_w_secundario/Volumen_secundario
```

```
end
```

```
if(diferencia_temperatura_primario<diferencia_minima and  
diferencia_temperatura_secundario<diferencia_minima)then
```

```
    write (hfile, "\n")
```

```
    write (hfile,"Devanado"," ", "Temperatura_anterior","  
    ", "Temperatura_promedio_devanado"," ", "Factor_Correccion"," ", "Perdidas")
```



```
write (hfile, "\n")

write (hfile,"Primario", "
",ceil(Temperatura_anterior_primario*100)/100,"
",ceil(Temperatura_dev_promedio_primario*100)/100,"
",ceil(Factor_correccion_temperatura_primario*100)/100,"
",ceil(Perdidas_primario*100*Volumen_primario)/100)

write (hfile, "\n")

write(hfile,"Secundario", "
",ceil(Temperatura_anterior_secundario*100)/100,"
",ceil(Temperatura_dev_promedio_secundario*100)/100,"
",ceil(Factor_correccion_temperatura_secundario*100)/100,"
",ceil(Perdidas_secundario*100*Volumen_secundario)/100)

---

if(Busqueda=="Si")then

    X= ancho_nucleo

    Temperatura_maxima=0

    Y= altura_diferencia_devanado_nucleo

    paso_x=0.1

    paso_y=0.1

    n=1

    m=1

    while (X<ancho_nucleo+ancho_devanado)do

while(Y<altura_diferencia_devanado_nucleo+alto_devanado)do

        while (n<=capas)do

            while (m<=espiras_serie)do

if(disposicion_conductores==1)then
```

```

                                                                    if(
((X<ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo))or
((X>ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n)*diametro_primario+(n-1)*gap_horizontal)and
(X<ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n)*diametro_primario+(n)*gap_horizontal)))then

    Temperatura_med = ho_getpointvalues(X,Y)

                                                                    Dentro = "A"

                                                                    else                if(
((X>ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n-1)*diametro_primario+(n-1)*gap_horizontal)    and
(X<ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n)*diametro_primario+(n-1)*gap_horizontal)) )then

                                                                    if(                (Y
>altura_diferencia_devanado_nucleo+radio_primario + (m-1)*gap_2+ (m-1)*diametro_primario) and
(Y<altura_diferencia_devanado_nucleo+radio_primario + (m)*gap_2+ (m-1)*diametro_primario))then

    Temperatura_med = ho_getpointvalues(X,Y)

                                                                    Dentro =
"A"

                                                                    end

                                                                    end

                                                                    end

    if(Temperatura_med>Temperatura_maxima and Dentro == "A")then

    Temperatura_maxima=Temperatura_med

    Dentro = "B"

    X1=X
```

```
Y1=Y

end

end

if

(disposicion_conductores==2)then

if(

X<ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo)then

Temperatura_med = ho_getpointvalues(X,Y)

Dentro = "A"

else

if((X>ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n-1)*gap_horizontal+(n-1)*diametro_primario) and
(X<ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n-1)*gap_horizontal+(n)*diametro_primario))then

if((Y>altura_diferencia_devanado_nucleo+radio_primario+(m-1)*2*gap_vertical+(m-
1)*diametro_primario)and(Y<altura_diferencia_devanado_nucleo+radio_primario+(m)*2*gap_vertical+
(m-1)*diametro_primario))then

Temperatura_med = ho_getpointvalues(X,Y)

Dentro =

"A"

end

else if(

((X>ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n)*diametro_primario+(n-1)*gap_horizontal) and
(X<ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(n)*diametro_primario+(n)*gap_horizontal)))then

if(((Y>altura_diferencia_devanado_nucleo+(m-1)*2*gap_vertical-
```

```
gap_vertical+radio_primario)and(Y<altura_diferencia_devanado_nucleo+(m-1)*2*gap_vertical+gap_vertical-radio_primario)))then
```

```
Temperatura_med = ho_getpointvalues(X,Y)
```

```
Dentro =
```

```
"A"
```

```
end
```

```
else
```

```
if((X>ancho_nucleo+separacion_espiras_nucleo+(capas-1)*diametro_primario)and(X<ancho_nucleo+ancho_devanado-radio_primario))then
```

```
if((Y>altura_diferencia_devanado_nucleo+(m-1)*2*gap_vertical-gap_vertical+radio_primario)and(Y<altura_diferencia_devanado_nucleo+(m-1)*2*gap_vertical+gap_vertical-radio_primario))then
```

```
Temperatura_med = ho_getpointvalues(X,Y)
```

```
Dentro =
```

```
"A"
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
if(Temperatura_med==nil)then
```

```
Temperatura_med=0
```

```
end
```

```
if(Temperatura_med>Temperatura_maxima and Dentro == "A")then
```

```
Temperatura_maxima=Temperatura_med
```

```
Dentro = "B"
```

```
X1=X
```

```
Y1=Y
```

```
end
```

```
end
```

```
m=m+1
```

```
end
```

```
m=1
```

```
n=n+1
```

```
end
```

```
n=1
```

```
Y= Y+paso_y
```

```
end
```

```
Y=altura_diferencia_devanado_nucleo
```

```
X=X+paso_x
```

```
end
```

```
X= ancho_nucleo
```

```
end
```

```
---
```

```
end --Final de una vez encontrada la diferencia de 3 ºC
```

```
--Inicialización
```

```
Temperatura_sumada_primario=0
```

```
Temperatura_sumada_secundario=0

Y = altura_diferencia_devanado_nucleo

X= Nucleo[2]+radio_primario+separacion_espiras_nucleo

Conductor=1

Temperatura_anterior_primario= Temperatura_dev_promedio_primario

Temperatura_anterior_secundario= Temperatura_dev_promedio_secundario

-----

end

closefile(hfile)

end
```

## **B. Programa LUA de la máquina eléctrica de imanes permanentes.**

-- Programa máquina eléctrica --

```
newdocument(2)

hi_saveas("Maquina.feh")

hi_probdef("millimeters","axi",1E-8,20,30)

-----DATOS-----

--Dibujo

pi = 3.14159

A=95

B=82.5

C=2

D=3

E=50

G=8

H=22
```

I=18

J=23

L=50

M=12

N=3

O=32.5

P=10

Q=3

R=2

F= G+H+R

--

--Perdidas y otros datos dibujo

perdidas\_Devanado = 220--Cobre

Volumen\_Devanado= ((2\*E+2\*I)\*pi\*((B-C-G)^2-(B-C-G-H)^2))\*10^-9

perdidas=0 -- Aire carcasa

espesor =0.1

conveccion\_carcasa=80

conveccion\_ejeArriba = 20

conveccion\_ejeAbajo=30

conveccion\_interior=20

gap\_espiras = 1 --Devanado

numero\_devanados =6 --Devanado

numero\_separaciones = 20 --Exterior Carcasa

Separacion\_conveccion = A/numero\_separaciones --Exterior carcasa

--

--Temperaturasconveccion

Temperatura\_Conveccion\_Carcasa= 285--12°C

Temperatura\_Conveccion\_EjeArriba = 285

Temperatura\_Conveccion\_EjeAbajo = 285

Temperatura\_Conveccion\_Interior = 285

--

--Material

Material\_Devanado =1 -- (1 Cobre 2 Plata)

Material\_Conexion= 2 -- (1 Aire, 2 Espuma, 3 Poliester, 4 Epoxi, 5 Mica, 6 Fibra de Vidrio, 7 Resina)

--

-- Datos refrigeración

Calor\_especifico = 1.024--[kJ/(kg·K)] Aire

Densidad = 1.225 --[kg/m<sup>3</sup>] Aire

Velocidad = 20 --[m/s] --Refrigerador

Area = 0.0028 --[m<sup>2</sup>] --Refrigerador

Potencia = 0.15 --[kJ/s] --Variará si Opcion == "Si"

Caudal\_masico = Velocidad\*Area\*Densidad --[kg/s]

Variacion\_Temperatura = Potencia/(Calor\_especifico\*Caudal\_masico) --[deltaT(K)]

--Opciones y temperatura ambiente

Busqueda="Si" -- Temperatura máxma

Opcion="No"--La potencia en función de la que disipa la capa anterior al aire-- Si o ""

--

-----

--Propiedades

hi\_addboundprop('Periodic', 4,0,0,0,0,0)



```
hi_addboundprop('ConveccionCarcasa', 2, 0, 0, Temperatura_Conveccion_Carcasa,conveccion_carcasa,
0)
```

```
hi_addboundprop('ConveccionEjeArriba', 2, 0, 0,
Temperatura_Conveccion_EjeArriba,conveccion_ejeArriba, 0)
```

```
hi_addboundprop('ConveccionEjeAbajo', 2, 0, 0,
Temperatura_Conveccion_EjeAbajo,conveccion_ejeAbajo, 0)
```

```
hi_addboundprop('ConveccionInterior',2,0,0,Temperatura_Conveccion_Interior,conveccion_interior,0)
```

-- Materiales

```
hi_addmaterial('Aire',0.025,0.025,0)
```

```
hi_addmaterial('Cobre', 401,401,perdidas_Devanado/Volumen_Devanado)
```

```
hi_addmaterial('Plata', 410,410,perdidas_Devanado/Volumen_Devanado)
```

```
hi_addmaterial('Ferrita',5,5,0)
```

```
hi_addmaterial('Aluminio',236,236,0)
```

```
hi_addmaterial('Acero',43,43,0)
```

```
hi_addmaterial('Poliester',0.275,0.275,0)
```

```
hi_addmaterial('Epoxi',0.34,0.34,0)
```

```
hi_addmaterial('Mica',0.35,0.35,0)
```

```
hi_addmaterial('FibraV',0.04,0.04,0)
```

```
hi_addmaterial('Resina',0.566,0.566,0)
```

```
hi_addmaterial('Espuma',2,2,0)
```

--Eje

```
hi_addnode(0,0)
```

```
hi_addnode(0,A+L)
```

```
hi_addnode(M,A+L)
```

```
hi_addnode(M,0)
```

```
hi_addsegment(0,0,0,A+L)
```

```
hi_addsegment(M,0,M,A+L)

hi_addsegment(M,A+L,0,A+L)

--Espesor

hi_addnode(M+espesor,A+L+espesor)

hi_addnode(M+espesor,A+espesor)

hi_addnode(0,A+L+espesor)

hi_addsegment(M+espesor,A+L+espesor,M+espesor,A+espesor)

hi_addsegment(0,A+L+espesor, 0,A+L)

hi_addsegment(0,A+L+espesor,M+espesor,A+L+espesor)

-- Simetria

--Eje

hi_addnode(0,0)

hi_addnode(0,-A-L)

hi_addnode(M,-A-L)

hi_addnode(M,0)

hi_addsegment(0,0,0,-A-L)

hi_addsegment(M,0,M,-A-L)

hi_addsegment(M,-A-L,0,-A-L)

--Espesor

hi_addnode(M+espesor,-A-L-espesor)

hi_addnode(M+espesor,-A-espesor)

hi_addnode(0,-A-L-espesor)

hi_addsegment(M+espesor,-A-L-espesor,M+espesor,-A-espesor)

hi_addsegment(0,-A-L-espesor, 0,-A-L)

hi_addsegment(0,-A-L-espesor,M+espesor,-A-L-espesor)
```

-- Carcasa

hi\_addnode (M,A)

hi\_addnode(M,A-D)

hi\_addnode(B-C,A)

hi\_addnode(B-C,A-D)

hi\_addnode(B,A)

hi\_addnode(B,0)

hi\_addnode(B-C,0)

--Perpendicular al eje

hi\_addsegment(M,A,M,A-D)

hi\_addsegment(M,A,B-C,A)

hi\_addsegment(M,A-D,B-C,A-D)

hi\_addsegment(B-C,A-D,B-C,A)

--Paralela al eje

hi\_addsegment(B-C,A,B,A)

hi\_addsegment(B,A,B,0)

hi\_addsegment(B-C,0,B-C,A)

--Espesor

hi\_addnode(B+espesor,A+espesor)

hi\_addnode(B+espesor,0)

hi\_addsegment(M+espesor,A+espesor,B+espesor, A+espesor)

hi\_addsegment(B+espesor,A+espesor,B+espesor,0)

-- Simetria

-- Carcasa

hi\_addnode (M,-A)

hi\_addnode(M,-A+D)

hi\_addnode(B-C,-A)

hi\_addnode(B-C,-A+D)

hi\_addnode(B,-A)

hi\_addnode(B,0)

hi\_addnode(B-C,0)

--Perpendicular al eje

hi\_addsegment(M,-A,M,-A+D)

hi\_addsegment(M,-A,B-C,-A)

hi\_addsegment(M,-A+D,B-C,-A+D)

hi\_addsegment(B-C,-A+D,B-C,-A)

--Paralela al eje

hi\_addsegment(B-C,-A,B,-A)

hi\_addsegment(B,-A,B,0)

hi\_addsegment(B-C,0,B-C,-A)

--Espesor

hi\_addnode(B+espesor,-A-espesor)

hi\_addnode(B+espesor,0)

hi\_addsegment(M+espesor,-A-espesor,B+espesor, -A-espesor)

hi\_addsegment(B+espesor,-A-espesor,B+espesor,0)

--Rotor

hi\_addnode(M,E)

hi\_addnode(M,E+Q)

hi\_addnode(M+O+N,E)

hi\_addnode(M+O+N,E+Q)

```
hi_addnode(M+O+N,0)

hi_addnode(M+O,0)

hi_addnode(M+O-P,0)

hi_addnode(M+O+N,E)

hi_addnode(M+O,E)

hi_addnode(M+O-P,E)

    --Perpendicular al eje

hi_addsegment(M,0,M,E)

hi_addsegment(M+O+N,0,M+O+N,E+Q)

hi_addsegment(M,E,M+O+N,E)

hi_addsegment(M,E+Q,M+O+N,E+Q)

    --Paralelo al eje

hi_addsegment(M+O+N,0,M+O+N,E)

hi_addsegment(M+O,0,M+O,E)

hi_addsegment(M+O-P,0,M+O-P,E)

    --Simetria

    --Rotor

hi_addnode(M,-E)

hi_addnode(M,-(E+Q))

hi_addnode(M+O+N,-E)

hi_addnode(M+O+N,-E-Q)

hi_addnode(M+O+N,0)

hi_addnode(M+O,0)

hi_addnode(M+O-P,0)

hi_addnode(M+O+N,-E)
```

hi\_addnode(M+O,-E)

hi\_addnode(M+O-P,-E)

--Perpendicular al eje

hi\_addsegment(M,0,M,-E)

hi\_addsegment(M+O+N,0,M+O+N,-E-Q)

hi\_addsegment(M,-E,M+O+N,-E)

hi\_addsegment(M,-E-Q,M+O+N,-E-Q)

--Paralelo al eje

hi\_addsegment(M+O+N,0,M+O+N,-E)

hi\_addsegment(M+O,0,M+O,-E)

hi\_addsegment(M+O-P,0,M+O-P,-E)

--Estator

hi\_addnode(B-C,0)

hi\_addnode(B-C,E+J)

hi\_addnode(B-C-F,0)

hi\_addnode(B-C-F,E+J)

hi\_addnode(B-C,E)

hi\_addnode(B-C-F,E)

hi\_addsegment(B-C-F,0,B-C-F,E+J)

hi\_addsegment(B-C,E+J,B-C-F,E+J)

--Simetria

--Estator

hi\_addnode(B-C,0)

hi\_addnode(B-C,-E-J)

hi\_addnode(B-C-F,0)

```
hi_addnode(B-C-F,-E-J)

hi_addnode(B-C,-E)

hi_addnode(B-C-F,-E)

hi_addsegment(B-C-F,0,B-C-F,-E-J)

hi_addsegment(B-C,-E-J,B-C-F,-E-J)

--Devanado

hi_addnode(B-C-G,E)

hi_addnode(B-C-G-H,E)

hi_addnode(B-C-G,E+I)

hi_addnode(B-C-G-H,E+I)

--Carton

hi_addnode(B-C-G+espesor,E+I)

hi_addnode(B-C-G+espesor,-E-I)

hi_addsegment(B-C-G,E,B-C-G,E+I)

hi_addsegment(B-C-G-H,E,B-C-G-H,E+I)

hi_addsegment(B-C-G,E+I,B-C-G-H,E+I)

--Espesor Carton

hi_addsegment(B-C-G+espesor,E+I,B-C-G,E+I)

hi_addsegment(B-C-G+espesor,E+I,B-C-G+espesor,-E-I)

--Material

hi_addblocklabel(B-C-G+espesor/2,E+I/2)

hi_selectlabel(B-C-G+espesor/2,E+I/2)

hi_addblocklabel(B-C-G+espesor/2,-E-I/2)

hi_selectlabel(B-C-G+espesor/2,-E-I/2)

hi_addblocklabel(B-C-G+espesor/2,0)
```

```
hi_selectlabel(B-C-G+espesor/2,0)

hi_setblockprop('Aire',1,3,")

hi_clearselected()

    --Simetria

    --Devanado

hi_addnode(B-C-G,-E)

hi_addnode(B-C-G-H,-E)

hi_addnode(B-C-G,-E-I)

hi_addnode(B-C-G-H,-E-I)

    --Espesor cartón

hi_addsegment(B-C-G+espesor,-E-I,B-C-G,-E-I)

hi_addsegment(B-C-G,-E,B-C-G,-E-I)

hi_addsegment(B-C-G-H,-E,B-C-G-H,-E-I)

hi_addsegment(B-C-G,-E-I,B-C-G-H,-E-I)

    --Unión devanado

hi_addsegment(B-C-G-H,-E-I,B-C-G-H,E+I)

hi_addsegment(B-C-G,-E-I,B-C-G,E+I)

    --Separación aislante devanado

hi_addsegment(B-C,E,B-C-G,E)

hi_addsegment(B-C-G-H,E,B-C-F,E)

hi_addsegment(B-C,-E,B-C-G,-E)

hi_addsegment(B-C-G-H,-E,B-C-F,-E)

    -- Numero de devanados

Anchura_conductor = (H-(numero_devanados-1)*gap_espiras)/numero_devanados

X= B-C-G-H+Anchura_conductor
```



Y=-E-I

Condicion = "A"

while(X<(B-C-G))do

    hi\_addnode(X,Y)

    hi\_addnode(X,Y+2\*E+2\*I)

    hi\_addsegment(X,Y+2\*E+2\*I,X,Y)

    if(Condicion == "A" ) then

        hi\_addblocklabel(X-Anchura\_conductor/2,0)

        hi\_selectlabel(X-Anchura\_conductor/2,0)

        if (Material\_Devanado==1)then

            hi\_setblockprop('Cobre',1,3,"")

        else if (Material\_Devanado==2) then

            hi\_setblockprop('Plata',1,3,"")

        end

    end

X=X + gap\_espiras

Condicion = "B"

else if(Condicion == "B")then

    hi\_addblocklabel(X-gap\_espiras/2,0)

    hi\_selectlabel(X-gap\_espiras/2,0)

    if(Material\_Conexion==1) then

        hi\_setblockprop('Aire',1,3,"")

    else if (Material\_Conexion==2) then

        hi\_setblockprop('Espuma',1,3,"")

    else if (Material\_Conexion==3)then

```
        hi_setblockprop('Poliester',1,3,"")

    else if(Material_Conexion==4)then

        hi_setblockprop('Epoxi',1,3,"")

    else if(Material_Conexion==5)then

        hi_setblockprop('Mica',1,3,"")

    else if(Material_Conexion==6)then

        hi_setblockprop('FibraV',1,3,"")

    else if(Material_Conexion==7)then

        hi_setblockprop('Resina',1,3,"")

    end

end

end

end

end

end

end

end

end

X= X+Anchura_conductor

Condicion = "A"

hi_clearselected()

end

hi_clearselected()

if (X==(B-C-G))then

    hi_addblocklabel(X-Anchura_conductor/2,0)

    hi_selectlabel(X-Anchura_conductor/2,0)

    if (Material_Devanado ==1)then
```

```
        hi_setblockprop('Cobre',1,3,")

    else if (Material_Devanado==2) then

        hi_setblockprop('Plata',1,3,")

    end

end

end

hi_clearselected()

end

end

Y_ref=-A

cont=0

Temp= Temperatura_Conveccion_Carcasa

while (Y_ref<A)do

    cont=cont+1

    hi_selectsegment(B+espesor,Y_ref+Separacion_conveccion/2)

    Y_ref = Y_ref+ Separacion_conveccion

    hi_addnode(B+espesor,Y_ref)

    Temp=Temp+ Variacion_Temperatura

    Nombre= "ConveccionCarcasa"..cont

    hi_addboundprop(Nombre, 2, 0, 0, Temp,conveccion_carcasa, 0)

    hi_setsegmentprop(Nombre,"","","")

    hi_clearselected()

end

hi_selectsegment((B-M)/2,A+espesor)

hi_selectsegment((B-M)/2,-A-espesor)
```

```
hi_setsegmentprop('ConveccionCarcasa','','','')
```

```
hi_clearselected()
```

```
--Condiciones
```

```
hi_clearselected()
```

```
        --Aislante
```

```
hi_addblocklabel(B-C-G-H/2,E+I+((J-I)/2))
```

```
hi_addblocklabel(B-C-G-H/2,-E-I-((J-I)/2))
```

```
hi_selectlabel(B-C-G-H/2,E+I+((J-I)/2))
```

```
hi_selectlabel(B-C-G-H/2,-E-I-((J-I)/2))
```

```
if(Material_Conexion==1) then
```

```
    hi_setblockprop('Aire',1,3,"");
```

```
else if (Material_Conexion ==2) then
```

```
    hi_setblockprop('Espuma',1,3,"")
```

```
else if (Material_Conexion==3)then
```

```
    hi_setblockprop('Poliester',1,3,"")
```

```
else if(Material_Conexion==4)then
```

```
    hi_setblockprop('Epoxi',1,3,"")
```

```
else if(Material_Conexion==5)then
```

```
    hi_setblockprop('Mica',1,3,"")
```

```
else if(Material_Conexion==6)then
```

```
    hi_setblockprop('FibraV',1,3,"")
```

```
else if(Material_Conexion==7)then
```

```
    hi_setblockprop('Resina',1,3,"")
```

```
end
```

end

end

end

end

end

end

hi\_clearselected()

--Condiciones de contorno

--Aire Espesor

hi\_addblocklabel(M+espesor/2,A+L/2)

hi\_selectlabel(M+espesor/2,A+L/2)

hi\_setblockprop('Aire',1,3,"")

hi\_clearselected()

--Aire rotor

hi\_addblocklabel(M+(O-P)/2,E/2)--2

hi\_selectlabel(M+(O-P)/2,E/2)

hi\_setblockprop('Aire',1,3,"")

hi\_clearselected()

--Aire zona dentro de la carcasa

hi\_addblocklabel(B/2,(A+L)/2)--9

hi\_selectlabel(B/2,(A+L)/2)

hi\_setblockprop('Aire',1,3,"")

hi\_clearselected()

--Aluminio

hi\_addblocklabel(B-C/2,A/2)--7

```
hi_addblocklabel(M+B/2,A-D/2)--8
hi_addblocklabel(M+B/2,-A+D/2)--8
hi_selectlabel(B-C/2,A/2)
hi_selectlabel(M+B/2,A-D/2)
hi_selectlabel(M+B/2,-A+D/2)
hi_setblockprop('Aluminio',1,3,")
hi_clearselected()
--Conveccion interior
hi_selectsegment((B-M)/2,A-D-(A-E-J-D)/2)
hi_selectsegment((B-M)/2,-(A-D-(A-E-J-D)/2))
hi_selectsegment(M,A-D-(A-D-E-Q)/2)
hi_selectsegment(M,-(A-D-(A-D-E-Q)/2))
hi_selectsegment(M+(O+N)/2,E+Q)
hi_selectsegment(M+(O+N)/2,-E-Q)
hi_selectsegment(B-C-F,E+J/2)
hi_selectsegment(B-C-F,-E-J/2)
hi_selectsegment(B-C-F/2,E+J)
hi_selectsegment(B-C-F/2,-E-J)
hi_selectsegment(B-C, A-D-(A-D-E-J)/2)
hi_selectsegment(B-C, -(A-D-(A-D-E-J)/2))
hi_setsegmentprop('ConveccionInterior',"","","")
hi_clearselected()
--Conveccion Eje
hi_selectsegment(M+espesor, -A-L/2)
hi_selectsegment(M/2, -A-L-espesor)
```

```
hi_setsegmentprop('ConveccionEjeAbajo',"","","")

hi_clearselected()

hi_selectsegment(M+espesor, A+L/2)

hi_selectsegment(M/2, A+L+espesor)

hi_setsegmentprop('ConveccionEjeArriba',"","","")

hi_clearselected()

--Material imanes

hi_addblocklabel(M+O+N/2,E/2)--5

hi_selectlabel(M+O+N/2,E/2)

hi_setblockprop('Ferrita',1,3,"")

hi_clearselected()

--Material acero

hi_addblocklabel(M/2,(A+L)/2)--1

hi_addblocklabel(M+O-P/2,E/2)--3

hi_addblocklabel(M+(O+N)/2,E+Q/2)--4

hi_addblocklabel(M+(O+N)/2,-E-Q/2)--4

hi_addblocklabel(B-C-G/2,0)--6

hi_addblocklabel(B-C-F+(F-G-H)/2,0)--6

hi_selectlabel(M/2,(A+L)/2)

hi_selectlabel(M+O-P/2,E/2)

hi_selectlabel(M+(O+N)/2,E+Q/2)

hi_selectlabel(M+(O+N)/2,-E-Q/2)

hi_selectlabel(B-C-G/2,0)

hi_selectlabel(B-C-F+(F-G-H)/2,0)

hi_setblockprop('Acero',1,3,"")
```

```
hi_clearselected()
```

```
hi_analyze(1) -- 0 no minimiza la ventana, 1 si
```

```
hi_loadsolution()
```

```
T,Fx,Fy,Gx,Gy,kx,ky= ho_getpointvalues(B+espesor/2,0)
```

```
--Obtener lugar y temperatura máxima en el aislamiento
```

```
if(Busqueda=="Si")then
```

```
    X=B-C-F
```

```
    Y=-E-J
```

```
    paso_x=0.1
```

```
    paso_y=10
```

```
    Temperatura_maxima=273
```

```
    n=1
```

```
    Dentro = "B"
```

```
    while( X<(B-C))do
```

```
        while(Y<(E+J))do
```

```
            while (n<(numero_devanados-1))do
```

```
                if((Y>E and (X<(B-C-G-H) or X>B-C-G)))then
```

```
                    Temperatura = ho_getpointvalues(X,Y)
```

```
                    Dentro = "A"
```

```
                else if( ((X>(B-C-G-H) and X<B-C-G))and ((Y>(E+I)) or (Y<(-E-  
I))))then
```

```
                    Temperatura = ho_getpointvalues(X,Y)
```

```
                    Dentro = "A"
```

```
                else if ((Y<-E and (X<(B-C-G-H) or X>(B-C-G))))then
```

```
                    Temperatura = ho_getpointvalues(X,Y)
```



```
Dentro = "A"

else if( (Y<(E+I) and Y>(-E-I))and ((X>(B-C-G-
H+n*Anchura_conductor + (n-1)*gap_espiras))and X<(B-C-G-H+n*(Anchura_conductor+gap_espiras)))
)then

    Temperatura = ho_getpointvalues(X,Y)

    Dentro = "A"

end

end

end

end

if(Temperatura>Temperatura_maxima and Dentro ==
"A")then

    Temperatura_maxima=Temperatura

    Dentro = "B"

    X1=X

    Y1=Y

end

n=n+1

end

n=1

Y=Y+paso_y

end

Y=-E-J

X=X+paso_x

end

end
```

```
if(Opcion=="Si")then

    Y_ref=-A+Separacion_conveccion

    cont=1

    while (Y_ref<(A-Separacion_conveccion))do

        cont=cont+1

        hi_selectsegment(B+espesor,Y_ref+Separacion_conveccion/2)

        Ta,Fxa,Fya,Gxa,Gya,kxa,kya= ho_getpointvalues(B-C,Y_ref+Separacion_conveccion/2)

        Tb,Fxb,Fyb,Gxb,Gyb,kxb,kyb= ho_getpointvalues(B,Y_ref+Separacion_conveccion/2)

        Tc,Fxc,Fyc,Gxc,Gyc,kxc,kyc= ho_getpointvalues(B-C/2,Y_ref+Separacion_conveccion/2)


        --Calculo Potencia Disipada

        Variacion_T= Ta-Tb

        Long_muestra= C*10^-3

        K=kxc

        Potencia_Disipada= ((Variacion_T)/(Long_muestra/(K*10^-3)))*10^-3

        --Variación de temperatura debido al intercambio

        Variacion_Temperatura = Potencia_Disipada/(Calor_especifico*Caudal_masico)

        Temp=Temp+ Variacion_Temperatura

        Nombre= "ConveccionCarcasa"..cont

        hi_addboundprop(Nombre, 2, 0, 0, Temp,conveccion_carcasa, 0)

        hi_setsegmentprop(Nombre,"","","")

        hi_clearselected()

        Y_ref = Y_ref+ Separacion_conveccion

    end

hi_saveas("Maquina_1.feh")
```

```
hi_probdef("millimeters","axi",1E-8,20,30)

hi_analyze(1) -- 0 no minimiza la ventana, 1 si

hi_loadsolution()

end
```

### **C. Programa LUA “Ejecutar\_1”**

Se debe tener en cuenta a la hora de ejecutar el programa que son necesarios los ficheros de texto de los meses, 4.2, uno vacío “Resumen.txt” y otro “Hora.txt”

```
--Datos--

Meses = {"Enero.txt", "Febrero.txt", "Marzo.txt", "Abril.txt", "Mayo.txt", "Junio.txt",
"Julio.txt", "Agosto.txt", "Septiembre.txt", "Octubre.txt", "Noviembre.txt", "Diciembre.txt"}

cont=1

contador=1

Escritura= openfile("Resumen.txt","a+")

linea =1

conta=1

--.--

Escritura = openfile("Resumen.txt","w+") --Abre el fichero resumen.txt--

write(Escritura, "Temperatura media", "      ", "Temperatura minima", "      ", "Temperatura
maxima")-- Escribe en el fichero--

write(Escritura,"\n")

while(cont<13)do -- Dependiendo del mes, le asigna una cantidad de días--

    Estacion= openfile(Meses[cont],"r+")

    if(cont==1)then

        dias_mes=31

    else if(cont==2)then

        dias_mes= 28
```

```
else if(cont==3) then
    dias_mes=31
else if(cont==4)then
    dias_mes= 30
else if(cont==5) then
    dias_mes= 31
else if(cont==6)then
    dias_mes= 30
else if(cont==7) then
    dias_mes= 31
else if(cont==8)then
    dias_mes= 31
else if(cont==9) then
    dias_mes= 30
else if(cont==10) then
    dias_mes= 31
else if(cont==11)then
    dias_mes= 30
else if(cont==12) then
    dias_mes= 31
end
end
end
end
end
```

```
end

end

end

end

end

end

end

while(contador<(dias_mes+1))do --Escribe la temperatura máxima, mínima y media en el
fichero resumen.txt--

    write(Escritura,conta," ")

    while(linea< 7)do

        if (linea==2)then

            aaa = read(Estacion,"*l")

        else

            read(Estacion,"*l")

        end

        linea=linea+1

    end

    Temp_ant_min= Temp_min

    Temp_ant_max = Temp_max

    linea = 1

    read(Estacion,"*w")

    read(Estacion,"*w")

    Temp_med= read(Estacion,"*w")

    read(Estacion,"*l")
```

```
read(Estacion,"*I")

read(Estacion,"*w")

read(Estacion,"*w")

Temp_min =read(Estacion,"*w")

read(Estacion,"*I")

read(Estacion,"*I")

read(Estacion,"*w")

read(Estacion,"*w")

Temp_max = read(Estacion, "*w")

while(linea< 12)do

    read(Estacion,"*I")

    linea=linea+1

end

linea=1

write(Escritura,Temp_med,"    ",Temp_min,"    ",Temp_max)

write(Escritura,"\n")

contador=contador+1

conta=conta+1

end

closefile(Estacion)

cont=cont+1

contador=1

end

closefile(Escritura)
```

#### **D. Programa LUA “Ejecutar\_2”**

Se debe tener en cuenta, a la hora de ejecutar el programa, que son necesarios los ficheros: “Resumen.txt”, “Resumen\_1.txt” y “Final.txt”.

```
Lectura= openfile("Resumen.txt","r+")

read(Lectura,"*|")

--POR HORARIO--

PorHorario="no" --Si o ""-- Para seleccionar otro rango de temperaturas

Hora_max = 14

Hora_min= 8

-----

i=1

Temp_ant_max =16.8 --Es la temperatura del último día del año

Horario = -9

Espacio_15_7 = 34 --0.5 h Medidas cada media hora

Espacio_7_15 = 18-- 0.5 h Medidas cada media hora

Rangos = {}

Temperatura_minima = 10

Temperatura_maxima= 10

Escritura = openfile("Resumen_1.txt","w+")

write(Escritura, "Día", "    ", "Hora", "    ", "Temperatura")

write(Escritura, "\n")

contador=1

--Crear todas las temperaturas de forma lineal

while (i<366)do

    read(Lectura, "*w")
```

```
Temp_med=read(Lectura, "*w")

Temp_min=read(Lectura, "*w")

Temp_max=read(Lectura, "*w")

read(Lectura, "*l")

Separacion_Temp_A = Temp_ant_max-Temp_min --Entre días

Separacion_Temp_B = Temp_max-Temp_min --En el días

Separacion_Horas_A = Separacion_Temp_A/Espacio_15_7

Separacion_Horas_B = Separacion_Temp_B/Espacio_7_15

while (Horario<=15 and Horario>=-9)do

if(Horario <7 and Horario>=-9)then

    if(Horario>=-9 and Horario<7)then

        if(Horario == -9)then

            Temperatura_anterior = Temp_ant_max

        end

        Temperatura_real= Temperatura_anterior- Separacion_Horas_A

    end

else if(Horario==7)then

    Temperatura_real = Temp_min

else if ((Horario >7) and (Horario<15))then

    Temperatura_real = Temperatura_anterior + Separacion_Horas_B

else if (Horario == 15)then

    Temperatura_real = Temp_max

end

end

end
```



```
end

if (Horario<0)then

    write(Escritura, i-1,"      ", Horario+24,"      ", ceil(Temperatura_real*100)/100)

    write(Escritura, "\n")

else

    write(Escritura, i,"      ", Horario,"      ", ceil(Temperatura_real*100)/100)

    write(Escritura, "\n")

end

Temperatura_anterior = Temperatura_real

Horario = Horario + 0.5

contador=contador+1

end

Horario =-9

i=i+1

Temp_ant_max = Temp_max

end

closefile(Escritura)

closefile(Lectura)

Menor = openfile("Resumen_1.txt","r")

read(Menor,"*l")

i=1

-- Ver cual es la temperatura menor y mayor.

while (i<(contador))do

if (PorHorario=="Si")then

    read(Menor, "*w")
```

```
Hora= tonumber(read(Menor, "*w"))

if (Hora>=Hora_min and Hora<=Hora_max)then

    Temperatura_real = tonumber(read(Menor, "*w"))

else

    Temperatura_real= "a"

    read(Menor, "*w")

end

read(Menor, "*l")

else

    read(Menor, "*w")

    read(Menor, "*w")

    Temperatura_real = tonumber(read(Menor, "*w"))

    read(Menor, "*l")

end

if(Temperatura_real ~= "a")then

if (Temperatura_real<Temperatura_minima)then

    Temperatura_minima = Temperatura_real

end

if (Temperatura_real>Temperatura_maxima)then

    Temperatura_maxima=Temperatura_real

end

end

i=i+1

end

Numero_huecos = (ceil(Temperatura_maxima)-floor(Temperatura_minima))+1
```

```

for j=1,(Numero_huecos) do --Crear límite del rango

    Rangos[j]=0

end

cont=contador

contador = 1

i=1

closefile(Menor)

T=tonumber(Temperatura_minima)

Menr = openfile("Resumen_1.txt","r")

read(Menr,"*l")

--Asignar rango de temperaturas

while (i<(cont))do

    if (PorHorario=="Si")then

        read(Menr, "*w")

        Hora= tonumber(read(Menr, "*w"))

        if (Hora>=Hora_min and Hora<=Hora_max)then

            Temperatura_real = tonumber(read(Menr, "*w"))

        else

            Temperatura_real ="a"

        end

        read(Menr, "*l")

    else

        read(Menr, "*w")

        read(Menr, "*w")

        Temperatura_real = tonumber(read(Menr, "*w"))

    end

    i=i+1

end

closefile(Menor)

end

```

```
        read(Menr, "*"I")

    end

    while (contador<Numero_huecos)do

        if(Temperatura_real ~= "a")then

            if (Temperatura_real>=(T-1) and Temperatura_real<(T+0.5))then

                Rangos[contador]=Rangos[contador]+1

                contador= Numero_huecos

            else

                T=T+1

                contador=contador+1

            end

        else

            contador= Numero_huecos

        end

    end

    T=Temperatura_minima

    i=i+1

    contador = 1

end

closefile(Menr)

--Escribir el rango de temperaturas en los rangos

Final= openfile ("Final.txt", "w+")

x=Temperatura_minima

for j=1,(Numero_huecos) do

    write(Final, "(" ,x-0.5, "-" ,x+0.5, ")" , " ", Rangos[j])
```

```
write(Final, "\n")

x=x+1

end

closefile(Final)
```

### E. Cálculo de temperatura ambiente por rangos de trabajo de la máquina eléctrica.

Inicialmente se realiza todo el proceso idéntico a como está explicado en 4.2. Después se abre el programa “Ejecutar\_2” con LUA. Se modifican las variables “Hora\_max” y “Hora\_min” que representan la hora final e inicial de funcionamiento de la máquina, respectivamente. Se puede apreciar en la **¡Error! Argumento de modificador desconocido.** que en este caso se ha elegido que la máquina funcione desde las ocho de la mañana hasta las dos de la tarde.

```
4  --POR HORARIO
5  PorHorario="Si" --Si o ""-- Para seleccionar otro rango de temperaturas
6  Hora_max = 14
7  Hora_min= 8
8  --
```

Figura 39.- Trozo de código del programa "Ejecutar\_2" que muestra las variables a tener en cuenta.

Una vez realizado lo anterior y puesto en la variable “PorHorario = “Si” ”para que funcione el programa se procede a ejecutarlo. Una vez ejecutado se obtiene que la temperatura mínima es de -2.97 grados Celsius y que la temperatura máxima es de 36.22 grados Celsius.

Se observa que en el fichero “Resumen\_1.txt” se obtienen todos los días con todas las temperaturas cada 0.5 horas y en el fichero “Final.txt” se obtienen los rangos de temperaturas pero únicamente contabilizados los que están dentro de esas horas. Ello se observa en la Figura 40.

El número final “4745” es el resultado de sumar todos los números que hay en cada rango de temperaturas y simboliza que se han contado todas las medias horas que hay desde las ocho de la mañana hasta las dos de la tarde, el cual concuerda con  $13 \cdot 365$ ; ya que hay 13 medias horas desde las ocho hasta las dos y 365 días al año.

1	(-3.47--2.47)	3
2	(-2.47--1.47)	11
3	(-1.47--0.47)	12
4	(-0.47-0.53)	29
5	(0.53-1.53)	50
6	(1.53-2.53)	56
7	(2.53-3.53)	66
8	(3.53-4.53)	73
9	(4.53-5.53)	109
10	(5.53-6.53)	143
11	(6.53-7.53)	156
12	(7.53-8.53)	195
13	(8.53-9.53)	213
14	(9.53-10.53)	221
15	(10.53-11.53)	218
16	(11.53-12.53)	205
17	(12.53-13.53)	187
18	(13.53-14.53)	187
19	(14.53-15.53)	167
20	(15.53-16.53)	182
21	(16.53-17.53)	199
22	(17.53-18.53)	191
23	(18.53-19.53)	186
24	(19.53-20.53)	203
25	(20.53-21.53)	193
26	(21.53-22.53)	193
27	(22.53-23.53)	176
28	(23.53-24.53)	161
29	(24.53-25.53)	145
30	(25.53-26.53)	123
31	(26.53-27.53)	110
32	(27.53-28.53)	91
33	(28.53-29.53)	77
34	(29.53-30.53)	66
35	(30.53-31.53)	54
36	(31.53-32.53)	41
37	(32.53-33.53)	29
38	(33.53-34.53)	16
39	(34.53-35.53)	6
40	(35.53-36.53)	2
41	(36.53-37.53)	0
42	Sumatorio	4745

Figura 40.- Rangos de temperatura y veces que se ha dado dicha temperatura cada 0.5 horas.

Para proseguir, se aplican las fórmulas de 4.2, resumidas en el Excel "Gráfica\_h\_T", y los datos de la Figura 40 de tal forma que se obtienen la Figura 41 y la Figura 42.

1	Rango T	Temperatura media	Horas	Sumatorio	Promedio	Temperatura de trabajo	Vida Útil	%/horas	Vida% por rango
2	(-3.47--2.47)	-3	3	3	0,000632244	-3	4,76E+08	2,10E-07	6,30E-07
3	(-2.47--1.47)	-2	11	14	0,002950474	-2	4,44E+08	2,25E-07	2,48E-06
4	(-1.47--0.47)	-1	12	26	0,005479452	-1	4,14E+08	2,41E-07	2,90E-06
5	(-0.47-0.53)	0	29	55	0,011591149	0	3,87E+08	2,59E-07	7,50E-06
6	(0.53-1.53)	1	50	105	0,022128556	1	3,61E+08	2,77E-07	1,39E-05
7	(1.53-2.53)	2	56	161	0,033930453	2	3,37E+08	2,97E-07	1,66E-05
8	(2.53-3.53)	3	66	227	0,047839831	3	3,14E+08	3,18E-07	2,10E-05
9	(3.53-4.53)	4	73	300	0,063224447	4	2,93E+08	3,41E-07	2,49E-05

Figura 41.- Recorte del Excel "Gráfica\_h\_T".

Horas totales 4745

DATOS		Unidades
$\Delta T$	0	$^{\circ}\text{C}$
$V_o$	1000	V
$L_o$	1,51E+06	V
$T_o$	80	$^{\circ}\text{C}$
$V_{tr}$	1000	V

Resultados	
% Total rango	4,33E-03
Total perdido eq %Vida/horas	9,12E-07
$V_{util\_eq}$	1,10E+08
T	18,1705246
$T_{eq\ amb}$	18,1705246

Figura 42.- Resultado del proceso "PorHorario".

Finalmente, se aprecia en la Figura 42 que la temperatura equivalente en el rango de horas de ocho de la mañana a dos de la tarde en función de la vida útil a tener en cuenta en los cálculos es de 18.17 $^{\circ}\text{C}$ .

## F. Materiales usados en las clases de aislamiento.

### - Clase A.

En esta clase los materiales típicos que se suelen dar son los de la clase Y pero impregnados, además del nylon.

### - Clase E.

En esta clase los materiales típicos que se suelen utilizar son: Polietileno teraftalato y triacetato de celulosa.

### - Clase B.

En esta clase los materiales comúnmente usados son: Mica, fibra de vidrio, asbestos bituminizados, baquelita y enamel de poliéster.

### - Clase F.

En esta clase los materiales usados son los de la clase B junto con Alkyd y resinas basadas en epoxi y poliuretano.

- **Clase H.**

En esta clase los materiales usados son los materiales de la clase B con aglutinante resinoso de siliconas, goma siliconada, poliamida aromática, fibra de poliamida y enamel de estermida.

- **Clase N.**

Se trata de la clase B pero con aglutinantes inorgánicos apropiados como Teflon, Mica, Mecanita, Vidrio, Cerámicos y Politetrafluoroetileno.

- **Clase R.**

Puede llegar a tener una variedad de materiales en su composición muy diferente.

### **G. Comprobación térmica experimental del funcionamiento del modelo FEMM térmico aplicado a transformadores**

El transformador sobre el que se experimenta está formado por 43 espiras de 1.55 milímetros cada una y distribuidas en forma de cruz en 5 capas y 9 espiras en serie por capa.

El procedimiento de medida de la temperatura en el devanado es el siguiente:

- Se alimenta uno de los devanados (bien el devanado primario, o el de secundario) a corriente constante, con una fuente de alimentación con las características adecuadas. El otro devanado se mantiene en circuito abierto.
- Se registra la corriente de alimentación para, una vez conocida la resistencia del devanado en continua, calcular las pérdidas por efecto Joule.
- Mediante un termopar colocado entre las espiras durante el proceso de fabricación del transformador se registra la temperatura en el devanado que se alimenta de forma continua, hasta que la temperatura alcanza un valor estacionario (variación de temperatura cada 15 minutos menor a 0.5 °C).

Este procedimiento puede repetirse para diferentes condiciones de operación, específicamente diferentes condiciones de pérdidas y del sistema de refrigeración del transformador, hasta conseguir un conjunto de puntos que permita la validación completa del modelo.

Se realizan cinco ensayos con el transformador cuyas condiciones y resultados se recogen en las siguientes tablas.



Tabla 11.-Condiciones y resultados del ensayo número 1.

Ensayo	1
<b>Condiciones</b>	
Material aislante	Aire
Alimentación secundario	0.4 Voltios / 10 Amperios
Alimentación primario	Abierto
Temperatura ambiente	15 °C
Convección frontal	$60 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
<b>Resultados</b>	
Temperatura máxima	36.2 °C
Pérdidas	2.44 W

Tabla 12.-Condiciones y resultados del ensayo número 2.

Ensayo	2
<b>Condiciones de ensayo</b>	
Material aislante	Aire
Secundario	0.4 Voltios / 25 Amperios
Primario	Abierto
Temperatura ambiente	16°C
Convección frontal	$60 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
<b>Resultados de ensayo</b>	
Temperatura máxima	85.2°C
Pérdidas	18.03 W

Tabla 13.-Condiciones y resultados del ensayo número 3.

Ensayo	3
<b>Condiciones de ensayo</b>	
Material aislante	Silicona
Secundario	0.4 Voltios / 10 Amperios
Primario	Abierto
Temperatura ambiente	17°C
Convección frontal	$60 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
<b>Resultados de ensayo</b>	
Temperatura máxima	29.8 °C
Pérdidas	2.3879 W

Tabla 14.-Condiciones y resultados del ensayo número 4.

Ensayo	4
<b>Condiciones de ensayo</b>	
Material aislante	Silicona
Secundario	0.5 Voltios / 15 Amperios
Primario	Abierto
Temperatura ambiente	17 °C
Convección frontal	$60 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
<b>Resultados de ensayo</b>	
Temperatura máxima	43.2 °C
Pérdidas	5.64 W

Tabla 15.-Condiciones y resultados del ensayo número 5.

Ensayo	5
<b>Condiciones de ensayo</b>	
Material aislante	Silicona
Secundario	0.4 Voltios / 25 Amperios
Primario	Abierto
Temperatura ambiente	17 °C
Convección frontal	$60 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
<b>Resultados de ensayo</b>	
Temperatura máxima	76.5 °C
Pérdidas	17.54 W

Como se muestra en las tablas anteriores, los cinco ensayos se han realizado con el primario en circuito abierto.

## H. Fórmulas para el cálculo de la vida útil y control del envejecimiento.

La primera variable “ $Max\_Usar\_horas\_$ ” es la vida útil inicial del aislamiento en función de la clase de aislamiento y el método escogido, 4.1.

La variable “ $Max\_Usar\_Horas\_perm$ ” es la cantidad de vida útil que le queda al aislamiento de la máquina eléctrica en función del ciclo de trabajo anterior.

$$Max_{usar_{Horas_{perm}}} = Max_{usar_{horas}} \cdot \%Queda_{nominal} \quad (39)$$

dónde “ $\%Queda_{nominal}$ ” es el porcentaje de vida útil que le queda al aislamiento y que inicialmente es 100%.

La variable “ $Horas_{usadas}$ ” y “ $Temp_{ciclo}$ ”, son el ciclo de trabajo de la máquina, dónde “ $Temp_{ciclo}$ ” se obtiene del programa LUA y “ $Horas_{usadas}$ ” es la cantidad de horas que trabaja la máquina a esa temperatura.

$$Quedan_{aT} = Max_{usar_{horas_{perm}}} - Horas_{usadas} \quad (40)$$

La variable " $Uso_{a_T}$ " simboliza el porcentaje de horas que se podían utilizar sobre el total a esa temperatura.

$$Uso_{a_T} = \frac{Horas_{usadas}}{Max_{usar_{horas_{perm}}}} \quad (41)$$

La variable " $Usado_{nom}$ " es el porcentaje de horas usado sobre el total a la temperatura nominal.

$$Usado_{nom} = Uso_{a_T} \cdot \%Queda_{nominal} \quad (42)$$

La variable " $Usado_{Acumulado}$ " es el sumatorio del porcentaje de envejecimiento que se ha producido por el efecto de la temperatura. Mientras que la variable  $\cdot \%Queda_{nominal}$  es lo restante, es decir, la vida útil que le queda al aislamiento.

$$\%Queda_{nominal} = 1 - Usado_{Acumulado} \quad (43)$$